

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

Área de Ingeniería Térmica



PROYECTO FINAL DE CARRERA

# **CARACTERIZACIÓN DE BOMBAS Y BICI-BOMBAS DE MECATE**

Autor: MANUEL PATRÓN CODESIDO

Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO

Ingeniería Técnica Industria especialidad Mecánica

Julio de 2012

**Agradecimientos:**

Gracias a Ulpiano por confiar en mi trabajo y ofrecerme la posibilidad de desarrollar este proyecto.

Gracias a mis padres y hermano por haber sido la fortaleza en los momentos de flaqueza.

Gracias a Marta por sacarme una sonrisa en cada paso del camino.

Gracias Isabel por todas las horas de trabajo que hemos pasado juntos en el laboratorio.

Gracias a mis compañeros por ayudar en todo el trabajo sucio.

# Tabla de contenido

1	Introducción .....	7
1.1	Bomba de mecate.....	8
1.2	Bici-bomba .....	9
1.3	Funcionamiento .....	10
1.4	Objetivos del proyecto .....	10
2	Base teórica.....	11
2.1	Caracterización de la instalación. ....	11
2.1.1	Relación teórica entre altura y masa indicada por el dinamómetro. ....	11
2.1.2	Volumen de agua en función de la altura:.....	13
2.1.3	Peso debido al agua: .....	14
2.1.4	Par sobre la rueda: .....	14
2.1.5	Caudal teórico .....	15
2.2	Caracterización fisiológica .....	16
2.2.1	Pulso .....	17
2.2.2	Velocidad angular .....	18
2.2.3	Estudios previos .....	18
2.3	Potencia suministrada al sistema.....	18
2.4	Rendimiento energético .....	20
2.5	Necesidades de agua .....	20
3	Instalación .....	21
3.1	Instalación inicial .....	21
3.2	Manivela y eje.....	22
3.3	Bicicleta .....	23
3.4	Freno-dinamómetro .....	25

3.5	Estructura base .....	27
3.6	Surtidor .....	28
3.7	Rueda.....	28
3.8	CAJA GUIA.....	32
3.9	Sistema de transmisión de potencia. ....	34
4	Resultados.....	37
4.1	Caracterización instalación .....	37
4.1.1	Gráfico de altura frente a masa dinamómetro .....	37
4.1.2	Comparación modelo teórico con datos experimentales.....	38
4.1.3	Caudal de pérdidas estático: .....	39
4.1.4	Velocidad angular crítica .....	40
4.1.5	Caracterización del freno.....	41
4.1.6	Análisis fuerzas de rozamiento Manivela .....	42
4.1.7	Análisis fuerzas de rozamiento Pedales .....	43
4.1.8	Análisis de parámetros que influyen en el par de rozamiento .....	44
4.1.9	Caudal extraído en función de la altura (usando manivela).....	47
4.1.10	Caudal extraído en función de la altura (usando bicicleta). ....	49
4.1.11	Comparación resultados teóricos y experimentales .....	50
4.1.12	Caudal de pérdidas en función de la frecuencia. ....	55
4.1.13	Caudal teórico (con caudal de pérdidas variable): .....	57
4.1.14	Comparación de resultados teóricos frente a experimentales (incluyendo caudal de pérdidas variable). ....	58
4.1.15	Error relativo .....	61
4.2	Caracterización fisiológica .....	63
4.2.1	Primera aproximación.....	63
4.2.2	Variación de la frecuencia frente al tiempo. ....	63
4.2.3	Variación de la frecuencia frente a la altura. ....	64

4.2.4	Variación de la frecuencia del Pedaleo frente al tiempo.....	64
4.2.5	Variación de la frecuencia de pedaleo frente a la altura.....	65
4.2.6	Análisis general .....	66
4.2.7	Pruebas cortas .....	68
4.2.8	Pruebas largas .....	74
4.2.9	Conclusiones caracterización fisiológica.....	76
4.3	Potencia y rendimiento energético.....	79
4.3.1	Potencia de trabajo en función de la altura (manivela).....	79
4.3.2	Potencia de trabajo en función de la altura (bicicleta). ....	79
4.3.3	Rendimiento energético.....	80
4.4	Análisis adecuación de la bomba de mecate. ....	83
5	Conclusiones .....	85
6	Nomenclatura .....	87
7	Bibliografía.....	90



# 1 Introducción

El presente proyecto se engloba dentro de las actividades desarrolladas por el *Laboratorio de Tecnologías Apropriadas*, encuadrado en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III. Este laboratorio tiene por objetivo aplicar los conocimientos para desarrollar técnicas eficientes que cubran necesidades básicas en países en vías de desarrollo especialmente en entornos rurales.

Los trabajos realizados en este laboratorio presentan dos vías principales de desarrollo:

- Suministro de agua potable (bombeo, distribución y potabilización) El presente proyecto se encontraría ubicado en este apartado, más concretamente en el apartado de bombeo.
- Acceso a la energía (calentamiento, secado, generación de energía eléctrica, iluminación, etc.)

Este proyecto es continuación de los proyectos: “*Instrumentación, adquisición de datos y ensayos de bici-bombas de mecate*” y “*Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate*”.

Paralelamente al desarrollo de este proyecto se realiza otro: “*Instalación y caracterización de bomba de mecate con motor eléctrico*” compartiendo datos.

### 1.1 Bomba de mecate.

La bomba de mecate ó “bomba de cuerda” es una bomba manual utilizada para extraer agua del subsuelo. Tiene como elemento fundamental un mecate (cuerda) auto enlazado o "sinfín", por medio del cual y accionándolo en "circuito cerrado", hace posible mover hasta la superficie porciones continuas de agua.

Con esta bomba, el agua es transportada a través de unos tapones de plástico (u otro material de fácil acceso que realice la misma función), que anudados a una cuerda o mecate pasan dentro de un tubo de PVC. Los tapones funcionan como pistones y el tubo de PVC funciona como cilindro.

La bomba de mecate se utiliza en pozos comunales o en pozos de uso individual familiar. Esos pozos pueden ser excavados o perforados, pudiendo éstos últimos tener un diámetro mínimo de 100 mm.

A continuación se muestra un esquema general de la bomba de mecate:

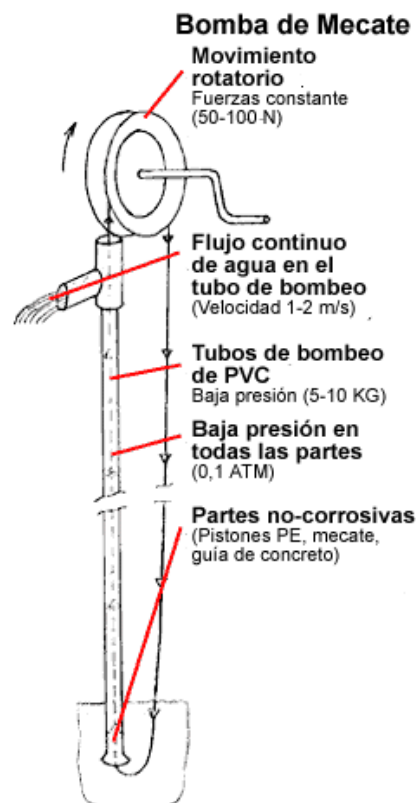


Ilustración 1 Bomba de mecate “<http://www.ropepumps.org>”



La bomba de mecate es adecuada para zonas donde el nivel de agua no sea muy profundo, ya que la capacidad de bombeo disminuye con la profundidad del pozo. La profundidad máxima a la que se han instalado comúnmente estas bombas es de 40 m., sin embargo, diseños especiales tienen capacidad para instalarse a los 80 m.

Con este tipo de bomba no hay que hacer mucho esfuerzo para sacar agua del pozo y su costo es asumible a nivel familiar.

Estas bombas también son utilizadas con propósitos agrícolas o ganaderos, para el riego y el suministro de agua para animales.

La bomba de mecate se puede adaptar para ser accionada con bicicleta, en el siguiente apartado se explica el funcionamiento básico de una bici-bomba de mecate.

## 1.2 Bici-bomba

La bomba de mecate es impulsada a pedales haciendo uso de una bicicleta, con la ventaja que el esfuerzo de bombeo puede sostenerse durante un tiempo más largo. Aunque su costo es un 30% más alto, su rendimiento es 50% superior que el modelo de bomba manual. Este proyecto se encarga de desarrollar un estudio de caracterización de la bici-bomba. En la ilustración 2 se muestra el esquema de una bici-bomba

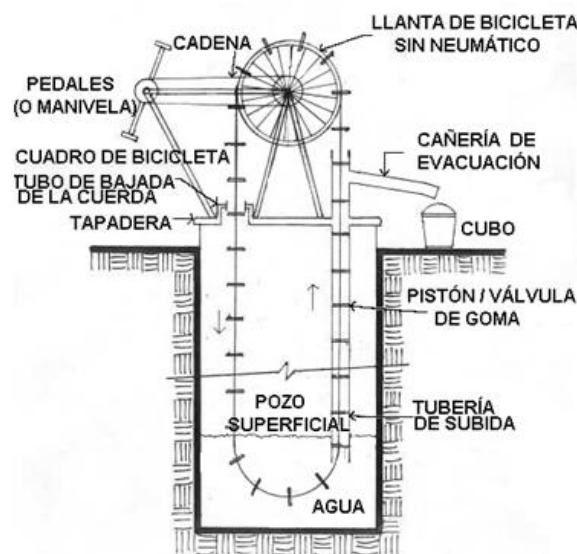


Ilustración 2 Bici-bomba (Estudio de la bomba de mecate, Phil Bartle, PhD)

### 1.3 Funcionamiento

Los elementos básicos de una bomba de mecate son un mecate o cuerda sin fin con pistones moldeados cónicamente y dispuestos (anudados a la cuerda) a intervalos de 1 m. El mecate con pistones es impulsado por una polea, de tal manera que eleva el agua a la superficie a través del tubo de PVC.

La polea se ancla sobre una madera que cubre la superficie del pozo y que dispone además de dos agujeros donde acometen los tubos de PVC, por donde baja y sube el mecate.

Para la polea se utiliza la llanta de una bicicleta o motocicleta, que es accionada por una manivela.

Los pistones se fabrican haciendo uso de plásticos o incluso cuero y deben tener una tolerancia mínima en el tubo de bombeo para evitar pérdidas en el fluido a bombear. El mecate con los pistones da la vuelta en el fondo del pozo por medio de una guía, a ser posible de vidrio para reducir la fricción en este punto. Es vital que el mecate esté perfectamente alineado con los tubos de entrada y salida así como con la guía para evitar rozamientos e incluso atascos.

### 1.4 Objetivos del proyecto

El primer paso de este proyecto es poner a punto el sistema, para ello durante varios meses se analiza el funcionamiento del mismo, buscando posibles vías de mejora y analizando fallos que disminuyan la eficiencia del mismo.

En una segunda fase del proyecto se procede a caracterizar el funcionamiento de la bomba de mecate. Con el fin de conseguir caracterizar el uso del sistema se plantean una serie de ecuaciones que simulan el funcionamiento del mismo. Dentro de esta fase también se realizan diferentes pruebas con el objetivo de corregir el modelo teórico original y demostrar que este se adecua a la realidad.

El proyecto consta de una tercera parte donde se analiza la respuesta humana en el uso de la bomba de mecate y la bici-bomba. El objetivo de este análisis es indicar unas condiciones óptimas de uso del sistema, acotando los niveles máximos de funcionamiento.

## 2 Base teórica

En este apartado se recopilan diferentes expresiones teóricas, con las cuales se caracteriza el sistema.

El capítulo se encuentra dividido en tres bloques temáticos:

- *Caracterización de la instalación*: donde se analiza el funcionamiento básico de la bomba de mecate, y se caracteriza el funcionamiento del freno.
- *Caracterización fisiológica*: en este bloque se enumeran y analizan las variables que se tendrán en cuenta en los experimentos llevados a cabo.
- *Potencia de trabajo y eficiencia energética*: en este bloque se desarrollan las expresiones teóricas con las que se calcularán la potencia de trabajo y la eficiencia energética.

### 2.1 Caracterización de la instalación.

En este apartado se desarrolla el estudio teórico que caracteriza el funcionamiento del sistema.

#### 2.1.1 Relación teórica entre altura y masa indicada por el dinamómetro.

En este apartado se hace uso y se complementa el estudio inicial desarrollado en el proyecto “*Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate*”, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Área de Ingeniería Térmica. 2011.

La función del freno en el sistema es simular diferentes alturas, analizando datos de caudal a diferentes profundidades y obteniendo los límites de funcionamiento de la bomba de mecate.

El freno se encuentra unido a un dinamómetro, el cual indica la fuerza de arrastre. Esta fuerza provoca un par de frenado que tiene que ser vencido por el usuario, consiguiéndose de esta manera variar el par necesario para mover la rueda y simular el esfuerzo requerido para extraer agua desde diferentes profundidades.

Sabiendo el diámetro del disco de freno se obtiene el par de frenado:

$$\tau_{fr} = F_{din} R_{DF}$$

Donde:

$$F_{din} = M_{din} \cdot g$$

De la ecuación anterior conocido el valor del radio: 0,06 m y la variación del valor de la fuerza (lectura del dinamómetro, según la fuerza con la que roza las zapatas del freno) se obtiene el par de frenada que es una función de la altura simulada.

Una vez que se ha conseguido cuantificar el momento provocado por el freno es necesario llegar a una relación que cuantifique el valor de la altura en función del par de frenado.

En una primera aproximación se considera que la fuerza de rozamiento del sistema es despreciable. De esta forma sobre la rueda solo aparecen dos momentos: el par de frenado y el par provocado por la columna de agua.

El par provocado por la columna de agua depende del volumen de agua acumulado en la tubería y por tanto de la profundidad a la que se encuentra el agua.

En los siguientes apartados se desarrolla la expresión que relaciona el par sufrido por el sistema en función de la altura a la que se encuentre la bomba:

### 2.1.2 Volumen de agua en función de la altura:

#### *Volumen de la tubería:*

El volumen total de agua que tendríamos sin tener en cuenta el volumen ocupado por la cuerda y los pistones es:

$$v_{tubería} = \pi \frac{R_{interior\ tubería}^2}{4} h = \pi \frac{0,0272^2}{4} h = 5,810 \cdot 10^{-4} h [m^3]$$

Con esta ecuación se relaciona el volumen comprendido dentro de la tubería en función de la altura.

A continuación se considerara una aproximación más real, ya que no todo el volumen de la tubería está ocupado por agua, sino que también se tiene una cuerda y pistones que ocuparan un determinado volumen. Esto se aborda en los siguientes puntos.

#### *Volumen de la cuerda:*

El volumen ocupado por la cuerda se encuentra relacionado con la altura, esta relación se analiza en la siguiente ecuación:

$$v_{cuerda} = \pi \frac{R_{cuerda}^2}{4} h = \pi \frac{0,004^2}{4} h = 1,257 \cdot 10^{-5} h [m^3]$$

#### *Volumen de los pistones:*

En este apartado lo primero que se calcula es el volumen de un pistón aislado, para realizar estos cálculos partimos de la base de que el pistón está formado por una parte cilíndrica y otra parte cónica:

$$v_{pistón} = v_{cilindro} + v_{cono}$$

$$v_{cilindro} = \pi \frac{R_{cilindro}^2}{4} h_{cilindro} = \pi \frac{0,0265^2}{4} 0,005 = 2,757 \cdot 10^{-6} [m^3]$$

$$v_{cono} = \frac{\pi R_{cono}^2 h_{cono}}{12} = \pi \frac{0,0265^2}{12} 0,0065 = 1,195 \cdot 10^{-6} [m^3]$$

$$v_{\text{pistón}} = v_{\text{cilindro}} + v_{\text{cono}} = 2,757 \cdot 10^{-6} + 1,195 \cdot 10^{-6} = 3,952 \cdot 10^{-6} [m^3]$$

Una vez que se ha calculado el volumen de un pistón se considera el número de pistones que tendremos dentro de la tubería. Partiendo del dato de que la distancia entre pistones es igual a un metro, el número total de pistones dentro de la tubería será el obtenido de dividir la altura entre la distancia entre pistones:

$$n_{\text{pistones}} = \frac{h}{d_{\text{entre ejes}}} = h$$

### 2.1.3 Peso debido al agua:

La densidad utilizada en las siguientes ecuaciones vale: 999,19 (Kg/m<sup>3</sup>).

Lo primero que se calcula es el volumen total de agua existente en la tubería (descontando el volumen ocupado por los pistones y por la cuerda):

$$\begin{aligned} v_{\text{total}} &= v_{\text{tubería}} - v_{\text{cuerda}} - n_{\text{pistones}} v_{\text{pistón}} \\ &= 5,810 \cdot 10^{-4} h - 1,257 \cdot 10^{-5} h - n_{\text{pistones}} 3,952 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Este cálculo solo será válido cuando el sistema entre en estacionario y el frente de agua llegue a 1 metro

De la formula anterior se calcula el volumen de agua en función de la altura de la tubería, de esta forma se cuantificar la fuerza que aparece debido al peso del agua.

$$P_{\text{agua}} = \rho v_{\text{total}} g = 999,19 \cdot (5,6843 \cdot 10^{-4} h - n_{\text{pistones}} \cdot 3,952 \cdot 10^{-6}) \cdot 9,81$$

### 2.1.4 Par sobre la rueda:

Con el valor de las diferentes fuerzas que actúan sobre la rueda se puede calcular el par al que se encuentra sometida la misma. Para ello en primer lugar se obtiene el radio de la rueda, teniendo en cuenta el radio de la rueda el espesor de la goma y el radio de la cuerda:

$$R_{\text{rueda}} = 0,198 [m]$$

Una vez conocida la fuerza que actúa sobre la rueda y el radio de la misma se procede a calcular el par existente en la rueda en función de la altura.

$$\tau_{ca} = F R = 999,19 \cdot (5,6843 \cdot 10^{-4} h - n_{pistones} \cdot 3,952 \cdot 10^{-6}) 9,81 \cdot 0,198 [N \cdot m]$$

Para analizar la relación existente entre el par de frenada y la altura simulada se realiza un equilibrio de momentos, obteniéndose de esta forma la siguiente ecuación:

$$F R = 999,19 \cdot (5,6843 \cdot 10^{-4} h - n_{pistones} \cdot 3,952 \cdot 10^{-6}) 9,81 \cdot 0,198$$

Consecuentemente se obtiene la siguiente relación:

$$h = \frac{F \cdot 0,055}{999,19 \cdot 9,81 \cdot 0,198 \cdot 5,6447810^{-4}}$$

La ecuación anterior presenta pequeñas desviaciones ya que el valor del número de pistones es igual a la parte entera de la altura.

### 2.1.5 Caudal teórico

En este apartado se plantea una expresión matemática que relaciona la velocidad angular con el caudal teórico. Esta resulta de gran utilidad ya que nos permite analizar los rangos de funcionamiento de la bomba de mecate de forma teórica.

A continuación se muestra la ecuación del caudal:

$$Q_{teórico} = \omega \cdot r \cdot (A_T - A_C) \cdot \phi - Q_{Pe} \left[ m^3/s \right]$$

Donde:

$Q_{Pe}$  = caudal de perdidas estático

$$\phi = \text{coeficiente de corrección} = \frac{(H_{FA} A_t - v_{pistón})}{H_p A_t}$$

El coeficiente de corrección es un término que tiene en cuenta el volumen ocupado por el pistón y el volumen de aire que se encuentra dentro de la columna de agua.

Partiendo de la afirmación “para niveles de agua superiores a 0,5 metros en el depósito la altura del frente de agua ( $H_{fa}$ ) será siempre igual a 1 metro” recogido en el proyecto mencionado al comienzo y comprobando que el nivel de agua del depósito cumple esta condición, se puede considerar que la columna de agua posee una altura de 1 metro. En la siguiente imagen se puede observar una columna de agua:



**Ilustración 3 Columna de agua**

Dado que no se aprecia la aparición de aire en la columna de agua, la altura de esta es igual a la distancia entre pistones, quedando la expresión del factor de corrección:

$$\phi = \frac{(1 A_t - v_{pistón})}{1 A_t} = \frac{5,515 \cdot 10^{-6} - 3,95 \cdot 10^{-6}}{5,515 \cdot 10^{-6}} = 0,9931975$$

La expresión final del caudal teórico es:

$$Q_{teórico} = \omega \cdot 0.198 \cdot 5.685 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9931975 - Q_{Pe} \left[ m^3/s \right]$$

## 2.2 Caracterización fisiológica

En este apartado se desarrollan unos conceptos que se utilizarán a lo largo del proyecto, con el objetivo de caracterizar fisiológicamente la respuesta del usuario en la utilización de la bomba de mecate.



Las variables analizadas en este apartado son cuatro:

- Edad
- Sexo
- Profundidad del pozo
- Tiempo de duración de la prueba

El objetivo planteado en este punto es acotar las limitaciones humanas en el uso de la bomba de mecate, para ello se realizan diferentes pruebas donde se modifican las variables de uso. Analizando posteriormente los siguientes parámetros de salida:

- Pulso
- Velocidad angular

### 2.2.1 Pulso

Para caracterizar una actividad física resulta muy útil el análisis de la frecuencia cardiaca (numero de contracciones del corazón por minuto).

El pulso de una persona depende de dos variables (sexo y edad) aunque existen otros parámetros que influyen en el número de pulsaciones por minuto como puede ser la condición física, antecedentes personales de salud etc.

El número de pulsaciones varía aproximadamente en 10 pulsaciones por minuto de la mujer frente al varón, mientras que la variación entre personas de edad comprendida entre 20-25 años y personas de 50-55 años es de aproximadamente 5 pulsaciones de más respecto a los primeros. Información procedente de: *J. Antonio Hernandez. I-natación.*

Para calcular la frecuencia cardiaca máxima a la que una persona puede realizar una actividad física sin temer por su salud se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$F_{cardiaca\ maxima} = 220 - edad\ (hombre)$$

$$F_{cardiaca\ maxima} = 226 - edad\ (mujer)$$

(*J. Antonio Hernandez. I-natación*).

### 2.2.2 Velocidad angular

La velocidad angular es un parámetro muy importante para caracterizar el uso de la bomba de mecate. El usuario debe de ser capaz de generar una frecuencia lo suficientemente alta como para vencer el caudal de pérdidas, lo que limita la profundidad máxima para la cual funciona el sistema.

A lo largo del estudio se analizara la influencia de la velocidad angular, acotando márgenes de funcionamiento óptimo.

### 2.2.3 Estudios previos

Según la tabla de datos publicada por el BM (Banco Mundial) en el informe *“El mercado de las bombas de mecate en Nicaragua”* los volúmenes extraídos medios en función de la profundidad son:

Profundidad (en metros)	Capacidad de Bombeo (en litros/minuto)
5	70
10	41
20	20
30	14
40	10

**Tabla 1 Caudal en función de la profundidad  
del pozo**

## 2.3 Potencia suministrada al sistema

En este apartado se plantean diferentes relaciones teóricas encaminadas a cuantificar la potencia suministrada al sistema. Para ello se plantea las siguientes ecuaciones:

$$W_s = \tau \cdot \omega$$

Donde:

$$W = potencia [w]$$

$$\tau = \text{momento} [N \cdot m]$$

$$\omega = \text{velocidad de giro} [rad/s]$$

El sistema presenta dos tipos de momentos, uno provocado por la columna de agua y otro por las fuerzas de rozamiento. Para el par provocado por la torre de agua nos basamos en las ecuaciones desarrolladas en los apartados anteriores, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{columna agua}} &= F R \\ &= 999,19 \cdot (5,6843 \cdot 10^{-4} h - n_{\text{pistones}} \cdot 3,952 \cdot 10^{-6}) 9,81 \cdot 0,198 [N \cdot m] \end{aligned}$$

El par debido a las fuerzas de rozamiento se calcula de forma experimental, los valores obtenidos se pueden ver en el apartado de “Resultados”.

Una vez cuantificado el valor de los diferentes momentos se puede calcular el valor de la potencia suministrada al sistema:

$$W_{\text{suministrada}} = W_{\text{extracción de agua}} + W_{\text{Rozamiento}}$$

$$W_{\text{extracción de agua}} = \tau_{\text{columna agua}} \cdot \omega$$

$$W_{\text{Rozamiento}} = \tau_{\text{Fuerza de rozamiento}} \cdot \omega$$

$$\begin{aligned} W_{\text{suministrada}} &= 999,19 \cdot (5,6843 \cdot 10^{-4} h - n_{\text{pistones}} \cdot 3,952 \cdot 10^{-6}) 9,81 \cdot 0,198 \cdot \omega \\ &+ \tau_{\text{Fuerza de rozamiento}} \cdot \omega \end{aligned}$$

En la relación anterior la potencia suministrada es función de la altura y de la velocidad angular, es decir, la potencia a suministrar aumenta principalmente de forma progresiva con la profundidad del pozo, y de modo secundario, aunque también proporcionalmente, respecto a las variaciones de frecuencia.

## 2.4 Rendimiento energético

En este apartado se analiza el rendimiento energético del sistema, comparando la energía suministrada con la energía ideal necesaria para ascender el volumen de agua (obtenido en los experimentos).

$$\eta_{energetico} = \frac{E_{suministrada}}{E_{ideal}} = \frac{W_{suministrada} \cdot t}{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q \cdot t} = \frac{W_{suministrada}}{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}$$

Haciendo uso de esta fórmula y de los datos experimentales obtenidos se obtiene el rendimiento energético, estos están recopilados en el apartado de “*Resultados*”.

## 2.5 Necesidades de agua

La cantidad de agua que se provee y que se usa en las viviendas es un aspecto importante que influye en la higiene y, por lo tanto, en la salud pública.

La necesidad básica de agua incluye el agua que se usa en la higiene personal, considerándose como valor mínimo 50 L/día persona. (O.M.S)

## 3 Instalación

Respecto al proyecto anterior, para analizar las posibles mejoras del sistema se desmonta el conjunto con el objetivo de entender el funcionamiento del mismo buscando aspectos que puedan ser perfeccionados con el fin de optimizar el funcionamiento.

En los siguientes apartados se estudia cada uno de los elementos del sistema, su uso y los procesos de mejoras llevados a cabo.

### 3.1 Instalación inicial

Inicialmente se realiza una valoración general del sistema, analizando en una primera aproximación el funcionamiento del mismo. A continuación se muestra una imagen del estado inicial:



Ilustración 4 Instalación inicial

Se enumeran las diferentes partes del sistema explicando su utilidad:

### 3.2 Manivela y eje

La manivela tiene por finalidad facilitar la aportación de potencia por parte de una persona. Está construida en cobre y posee las siguientes medidas:

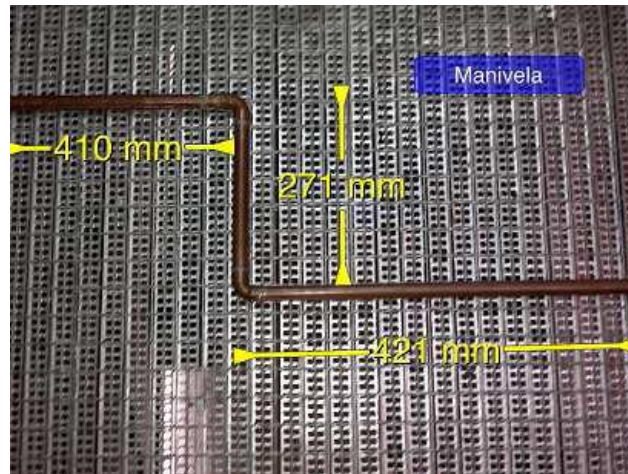


Ilustración 5 Manivela antigua

Por otro lado se puede observar el eje, su función es servir de soporte a la rueda y al disco de freno, girando de forma solidaria con estos, el eje está realizado en cobre.

Una mejora ha sido la sustitución del eje y de la manivela por otros dos nuevos de acero, esto aporta una mayor solidez al conjunto, asimismo, se toma la decisión de pintar el eje con una pintura antioxidante para metales con el objetivo de reducir al máximo la corrosión, teniéndose en cuenta que el entorno de trabajo es un ambiente expuesto al agua del propio sistema, lluvia, humedad, etc.

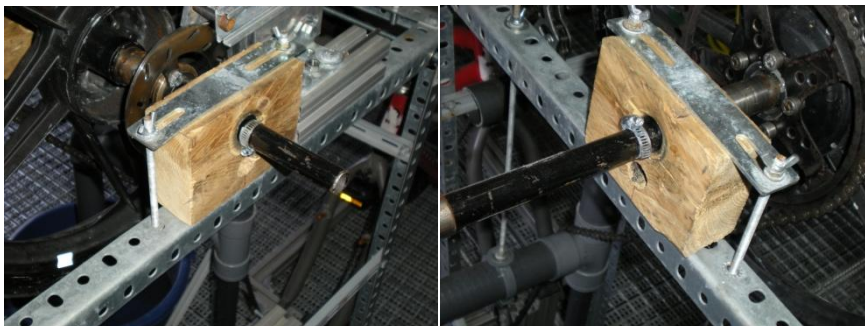


Ilustración 6 nuevo eje

Adicionalmente en los codos de la manivela, puntos de concentración de tensiones se añaden unas pletinas consiguiéndose una mejor distribución de esfuerzos.

En la siguiente imagen se puede observar la nueva manivela y las pletinas de acero:



Ilustración 7 Manivela nueva

### 3.3 Bicicleta

La bicicleta es uno de los elementos más importantes del sistema ya que permite suministrar una mayor transmisión de potencia del usuario al sistema.

La transmisión de potencia se realiza mediante el uso de una cadena que une el plato del eje del pedalier con el piñón el cual gira solidariamente con la rueda.

Las mejoras llevadas a cabo han sido:

En un primer instante la bicicleta presentaba un problema en el eje pedalier, ya que este se aflojaba de forma constante, esta incidencia se reprodujo de forma repetida hasta que terminó por desprenderse los pedales del chasis de la bicicleta.

Una vez sucedido esto se pudo observar que el desgaste de la zona roscada, donde se engancha el eje de los pedales, era elevado. La cavidad presentaba zonas donde la rosca había desaparecido por completo, debido fundamentalmente a la oxidación. Se procede a reconstruir la rosca con un macho de roscar pero el resultado fue deficiente. El macho no llegaba a enroscar en la cavidad, una vez observado que resultaba imposible solucionar el problema se lleva la bicicleta a un par de talleres



especializados, donde ambos coincidieron en que el incidente no tenía solución, a menos que se cambiase el cuadro entero de la bicicleta. En la siguiente imagen se muestra el deterioro mencionado:



**Ilustración 8 cavidad del eje pedalier**

Ante la evidencia de que el problema no permitía ninguna solución se decide cambiar por una nueva bicicleta. Esta solución resulta más económica ya que se tuvo acceso a una bicicleta en desuso. Las mejoras necesarias que se llevaron a cabo a partir de ese momento fueron dos:

- En primer lugar debido a la variación de la distancia entre ejes de la nueva bicicleta con respecto a la anterior fue necesario cambiar la estructura inicial, ya que era demasiado pequeña. Para satisfacer estas necesidades geométricas fue necesario la construcción de un nuevo soporte.
- La nueva bicicleta es más alta que la anterior, lo cual aportó una mayor comodidad a los usuarios. Para evitar las posibles oscilaciones o vuelcos se incorpora una mejora en la estructura de anclaje, aumentando el número de perfiles verticales.

En las siguientes imágenes se muestra la diferencia geométrica existente entre la base y la bicicleta:



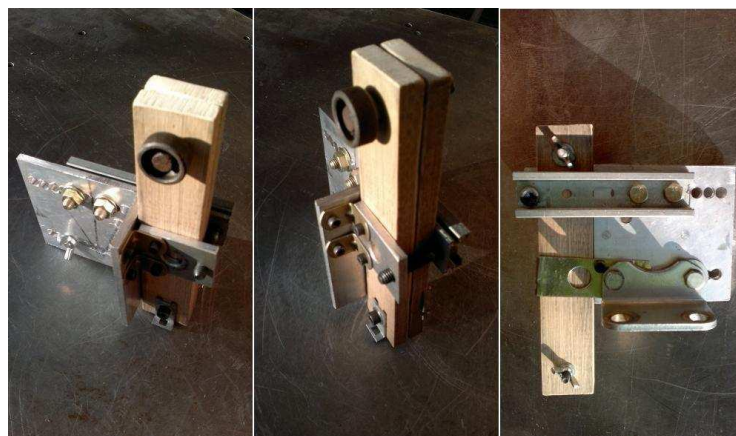


**Ilustración 9 Nueva bicicleta y desajuste de soportes**

Otra variación realizada que se deriva de la instalación de la nueva bicicleta es el cambio de relación entre número de dientes del plato de la bicicleta y el número de dientes que posee el piñón. Esta variación provoca que la relación sea demasiado elevada generando velocidades angulares de la rueda para las cuales el sistema no estaba diseñado: vibración excesiva en la cadena llegando a desengancharse y caudal desproporcionado para las condiciones de trabajo. Para solucionar este problema se decide cambiar el piñón. (Este proceso se explica en el apartado de “rueda”).

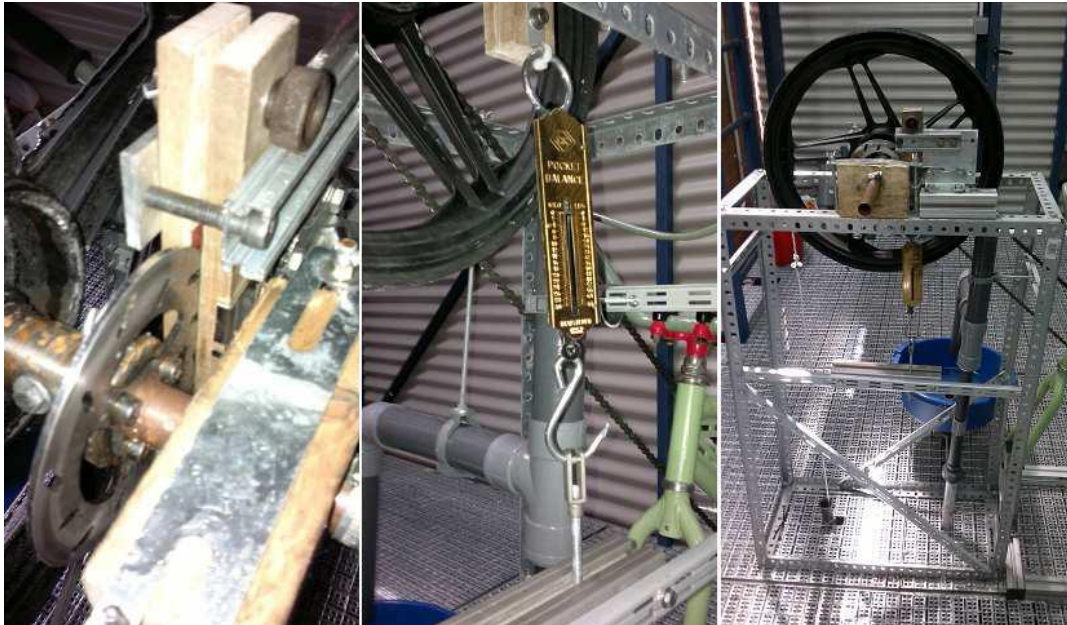
### 3.4 Freno-dinamómetro

El sistema se encuentra a una altura de 4,2 metros, que es la altura existente desde la planta del edificio hasta la salida del agua en la planta superior. Ya que esto supone una limitación para la obtención de datos se simulan múltiples alturas con la instalación de un disco de freno que gira solidario con la rueda. Paralelamente a este sistema se instala un soporte donde se introduce “las pastillas de freno”. A continuación se puede observar en la figura lo anteriormente descrito:



**Ilustración 10 Freno antiguo y soporte**

La parte móvil del freno está compuesta inicialmente por dos maderas en cuyo interior se encuentran albergadas las dos pastillas de freno. En la parte inferior del freno se instala un enganche que se usa para unir el freno a un dinamómetro, este a su vez se encuentra unido a la estructura, marcando inicialmente (situación de reposo) 0. A continuación se muestran algunas fotos del sistema:



**Ilustración 11 Funcionamiento del sistema de frenado**

Una vez que la bomba de mecate se pone en marcha el disco de freno pasa a rozar con las zapatillas, de esta forma aparece una fuerza de arrastre que es compensada con la fuerza del muelle, indicando el dinamómetro el valor de dicha fuerza (el valor que se observa en el dinamómetro viene expresado en Kg).

Los procesos de mejora llevados a cabo en este apartado consisten en:

- Disminución del ancho de las piezas de madera para conseguir una mejor adaptación al soporte.
- Se instalaron las zapatillas a ambos lados, en la instalación inicial solo había en un lado, de esta forma se evita el contacto disco de freno-madera, evitándose un desgaste excesivo del soporte del freno.



Ilustración 12 nuevo freno

### 3.5 Estructura base

La estructura base es la encargada de soportar el conjunto formados por rueda-cojinete-manivela, también se conecta a esta estructura la tubería de subida y el surtidor. La estructura original del sistema consistía en un paralelepípedo formado por barras angulares de 12 mm de anchura unidas por tornillería de métrica 8 y un par de barras diagonales puestas en las zonas laterales.

En las primeras semanas de uso del sistema se pudo observar que la estructura presentaba una tendencia a deformarse cuando se simulaban grandes alturas con el freno, este hecho provocó la ruptura de algunos de los tornillos de la base.

El proceso de mejora llevado a cabo ha consistido en la instalación de 4 tornillos en la base de la estructura y sustitución de los antiguos por los nuevos. Adicionalmente se han instalado dos barras en los laterales de menor superficie, evitando de esta forma que la estructura pandease.



Ilustración 13 Estructura base

### 3.6 Surtidor

El surtidor es el conjunto de tuberías que vierte el agua al exterior, las dimensiones iniciales del conjunto son: una tubería de ascenso de 32 mm de diámetro y un surtidor de diámetro 50 mm.



Ilustración 14 Surtidor

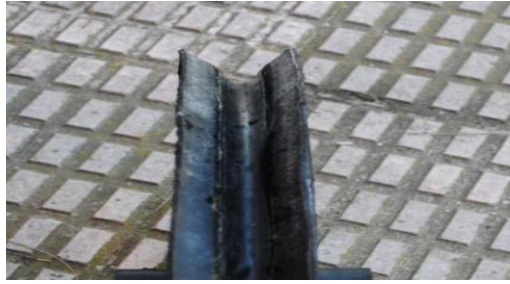
Con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema la rueda se centró en la estructura, esto aporta un mayor grado de estabilidad en el sistema, evitando que los pistones se enganchen en la salida del surtidor. Por otro lado, al observar que la rueda roza con la tubería del surtidor se procede a recortar la altura de la tubería en 5 cm.

### 3.7 Rueda

La función de la rueda es hacer de polea, arrastrando en su movimiento de giro una cuerda con pistones que se encuentra albergada en la concavidad de la llanta. La cuerda con los pistones en su movimiento por el interior de la tubería tiene la función de bombeo del agua.

La llanta se encuentra revestida por una cámara de aire y dos trozos de cubierta, obteniendo de esta forma dos anillos concéntricos que evitan deslizamientos entre la cuerda y la llanta.





**Ilustración 15 Gomas pegadas en las llantas**

Una vía de mejora ha consistido en pegar las gomas a la llanta. Consiguiendo de esta forma que la goma presentase una distribución uniforme:



**Ilustración 16 Restos de pegamento**

El proceso de pegado consistió en la aplicación de cola de contacto en la superficie de la llanta donde se une la goma, para un correcto pegado de las superficies se utilizaron pinzas como se muestra en la siguiente imagen:



**Ilustración 17 Proceso de pegado**

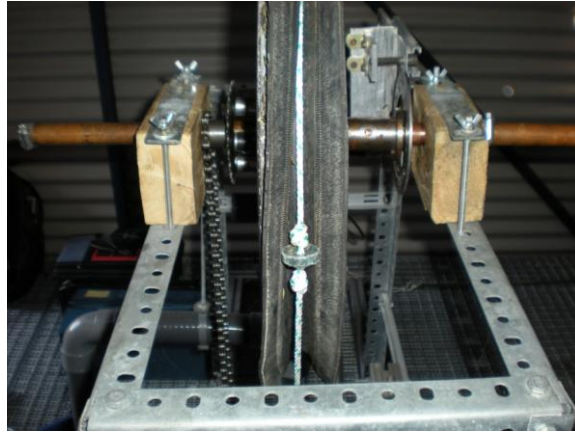
En una segunda fase de mejoras se optó por despegar las gomas de la llanta procediéndose a la limpieza de los restos de pegamento. Con este proceso se consiguió una superficie de contacto más lisa y uniforme aunque se produjeron daños en la pintura de la llanta. Fue necesario el lijado y repintado (con una pintura negra especial para metales expuestos a medios húmedos) de toda la superficie colindante.

Una vez terminado el proceso de limpieza, limado y pintado de la llanta se procedió a pegar las gomas, con un pegamento de uso industrial específico para zonas húmedas. Este proceso fue llevado a cabo en los laboratorios de la universidad, donde contamos con el apoyo de los técnicos y de herramientas más especializadas como pinzas industriales y “mini gatos”, como se muestra en la figura:



**Ilustración 18 Proceso de secado**

Se procede a recortar la goma, ya que esta era demasiado pequeña, consiguiendo de esta forma perfeccionar unas zonas donde esta se introducía en la parte interior de la llanta. Este cambio nos aporta una mayor estabilidad en el movimiento y evita que la cuerda deslizase en esas zonas. En la siguiente imagen se puede observar la protuberancia formada por la goma en la parte izquierda de la rueda:



**Ilustración 19 Zona abultada**

El recorte realizado en la goma llevaba la dirección longitudinal como se muestra en la siguiente imagen:



**Ilustración 20 Cortes longitudinales**

Finalmente la última variación llevada a cabo consiste en la instalación de un piñón más grande, ya que la nueva bicicleta posee unos platos muchos más grandes que la anterior.

Para mantener una relación 1:1, se realiza el cambio de plato. Esto requiere el aumento del agujero central del nuevo disco y la realización de una serie de 5 taladros para unir disco-rueda. Durante este proceso fue necesario el uso de un torno de control numérico, y una taladradora (esto se lleva a cabo en la oficina técnica de la universidad).

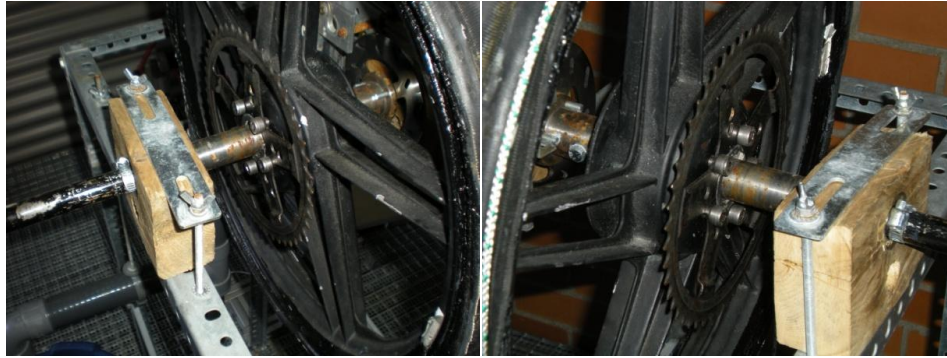


Ilustración 21 Nuevo plato

### 3.8 CAJA GUIA

La caja guía se encuentra en el piso inferior, sumergida dentro del depósito de agua en la zona central del mismo. Su finalidad es guiar la cuerda por el conducto de subida.

La caja guía posee una botella de cristal rellena de perdigones que tiene dos funciones básicas:

- Aportar peso a la caja guía para que esta no flote.
- Servir como polea para encauzar la cuerda en el sistema.

La caja guía presenta dos conductos:

1. por el que entran la cuerda con los pistones, que posee un embudo metálico para evitar que estos se enganchen con la caja.
2. Por el que salen la cuerda y los pistones, conectando a una tubería de aspiración por la que subirá el agua, hacia la parte superior de la estructura.

A Continuación se muestra una imagen de la caja guía, en la imagen se puede observar tanto la zona de entrada de la cuerda como la zona de salida (subida):



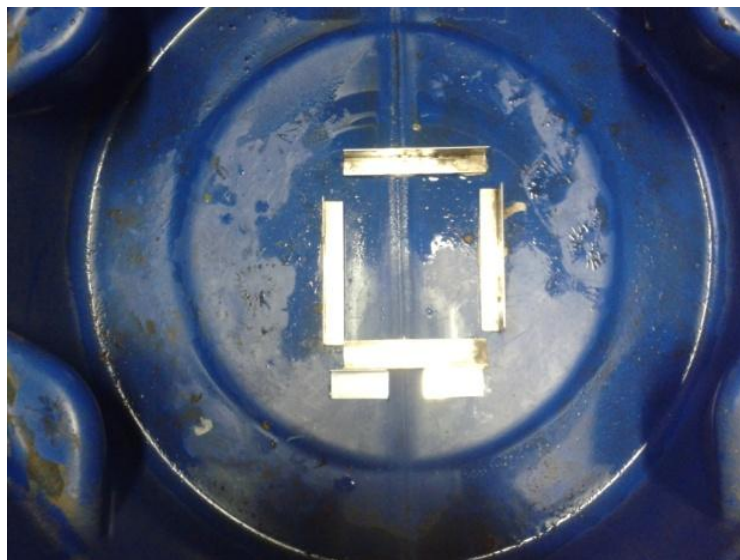


**Ilustración 22 Caja guía**

Inicialmente se observa que la caja guía oscila. Esto provoca que la cuerda y los pistones se enganchen. Para evitarlo se decide colocar perfiles rodeando la caja, además se fija la caja de tal forma que el conducto de subida se sitúa de forma perpendicular a la caja.

Las escuadras son de acero, las dos que se encuentran perpendiculares a la botella son de 75x180 mm y las dos paralelas a la botella son de 75x90 mm. Todas las escuadras han sido pegadas al depósito por medio de adhesivo reparador de plásticos de la marca “Pattex. Nural 92”.

En la siguiente imagen se muestra los perfiles y la caja guía:



**Ilustración 23 Perfiles**

También se observa que la tubería de ascenso presenta holguras, lo que provoca oscilaciones, para evitar estos desplazamiento se decidió pegar la tubería a la caja guía, la siguiente imagen muestra el proceso de pegado:



**Ilustración 24 Pegado tubería-caja guía**

### **3.9 Sistema de transmisión de potencia.**

El sistema inicial de transmisión de potencia consiste en una cadena que une el plato de la bicicleta con el piñón de la rueda, su objetivo es transmitir la potencia desarrollada por un usuario en la bicicleta al sistema.

Durante la realización de este proyecto, debido al aumento de distancia entre el plato y el piñón, ha sido necesario aumentar la longitud de la cadena. En las primeras pruebas realizadas al sistema se observó que la cadena vibraba excesivamente, llegando a desengancharse. Tras analizar las causas que provocan dicha vibración se llega a las siguientes conclusiones:

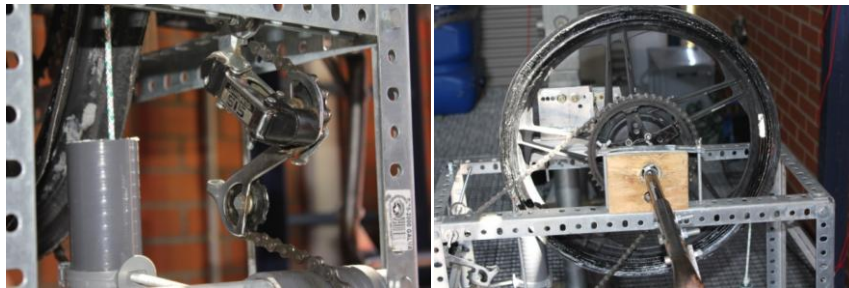
- La longitud entre plato y piñón es excesivamente grande.
- Las zonas de unión de las distintas cadenas presentan mayor rigidez que el resto de la cadena.

Una vez identificado los problemas que provocan la vibración se procede a realizar los siguientes cambios:

- Se cambia la cadena antigua (formada por 5 secciones unidas entre sí) por una nueva (formada por solo 2), disminuyendo de esta manera la aparición de eslabones rígidos.
- Dado que la longitud entre plato y piñón no se pueden reducir, se introduce en el sistema un tensor de bicicleta que absorba las oscilaciones.

Las mejoras llevadas a cabo han conseguido una mayor estabilidad del sistema, aumentando de forma notoria la comodidad en el uso de la bicicleta.

En la siguiente imagen se puede observar el tensor:



**Ilustración 25 Tensor y nueva cadena**



## 4 Resultados

Las tablas con los resultados numéricos obtenidos en las diferentes pruebas se encuentran en el Anexo I.

### 4.1 Caracterización instalación

#### 4.1.1 Gráfico de altura frente a masa dinamómetro

En este punto se analiza la relación existente entre el valor marcado por el dinamómetro y la altura teórica de trabajo. Los cálculos realizados en este apartado están basados en las ecuaciones desarrolladas en el punto “*Relación teórica entre altura y masa indicada por el dinamómetro*” desarrollado anteriormente.

Como se puede ver en la grafica (tabla 1 adjunta en el Anexo I) los datos están acotados para valores inferiores a 20 Kg, esto es debido a que el dinamómetro se vuelve muy inestable para valores mayores a 20 kg. En el desarrollo del proyecto los valores máximos utilizados han sido de 18-19Kg.

En la siguiente grafica se muestra la altura simulada frente al peso indicado por el dinamómetro:

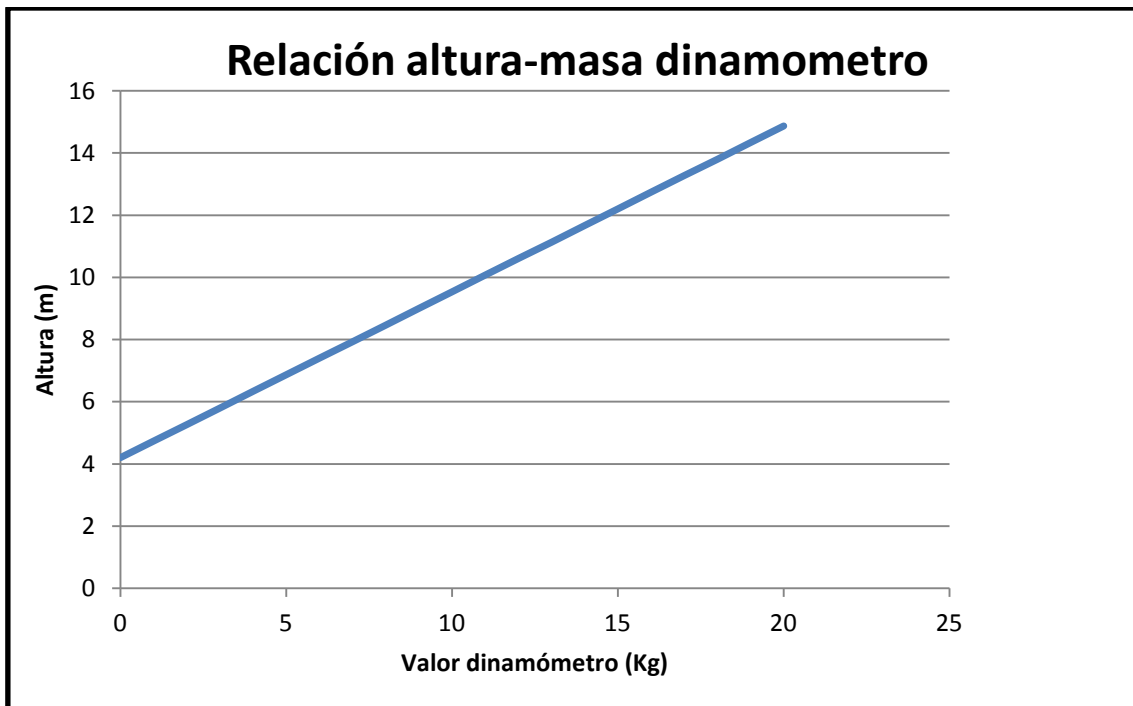


Ilustración 26 Relación altura-masa dinamómetro

#### 4.1.2 Comparación modelo teórico con datos experimentales.

Con el objetivo de demostrar la caracterización teórica expuesta en el apartado anterior y comprobar el correcto funcionamiento del sistema de frenado se realiza la siguiente comprobación:

Para diferentes valores indicados por el dinamómetro se comprueba el par que es necesario suministrar al sistema para ponerlo en movimiento.

La comprobación ha constado de los siguientes pasos:

- 1- Se constata el valor que marca el freno.
- 2- Se coloca la manivela en posición horizontal, colgando de ella una báscula digital de la que se cuelga un cubo.
- 3- Se vierte agua sobre el cubo, hasta poner en movimiento el sistema.
- 4- Se anota el valor que ha conseguido vencer el par de frenado.

Otras características del experimento son:

- La tubería de ascenso se encuentra vacía.
- Se retira la cuerda del sistema, evitando de esta forma la aparición de fuerzas que influyan en el resultado.
- Se comparan momentos aplicados sobre el eje.

En la siguiente gráfica se muestran los diferentes valores obtenidos. En el eje x se indican los valores mostrados por el dinamómetro, mientras que en el eje y se observa la fuerza que necesaria aplicada sobre la manivela para mover el sistema:

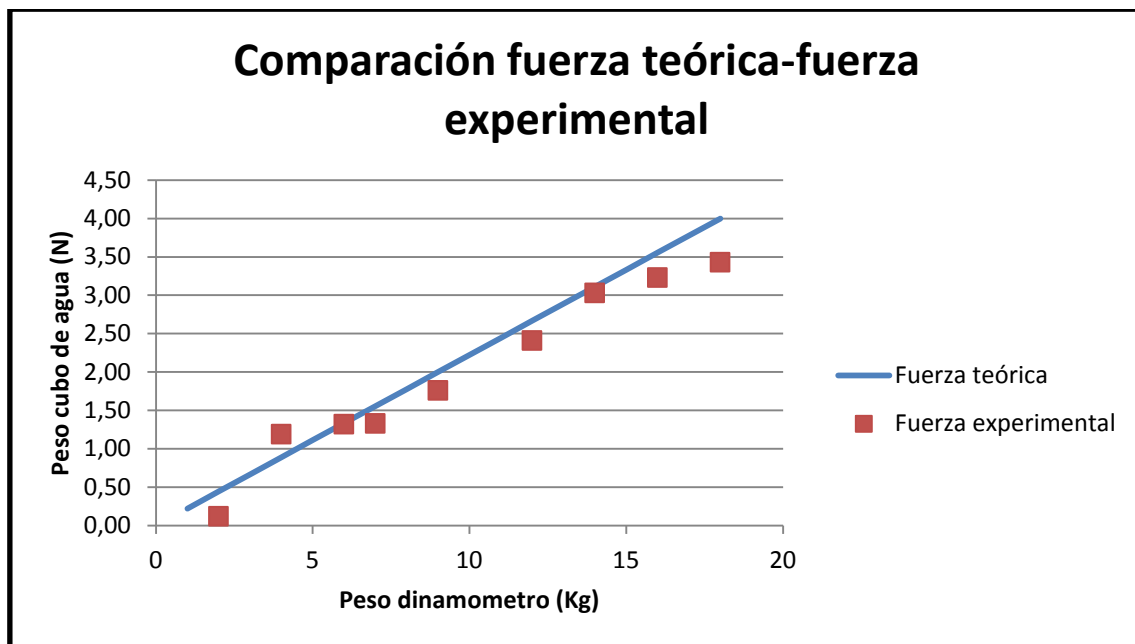


Ilustración 27 Comparación fuerza teórica-fuerza experimental

Como se puede observar en la gráfica anterior los valores obtenidos de forma experimental, confirman el planteamiento teórico realizado.

#### 4.1.3 Caudal de pérdidas estático:

Las medidas obtenidas en este estudio son específicas para el sistema desarrollado en este proyecto.

En el proyecto "*Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate*" se realiza el mismo estudio para el sistema original, el cual no usaba los mismos pistones.

Para cuantificar el caudal de pérdidas se realiza una serie de pruebas de vaciado del sistema, los experimentos constan de los siguientes pasos:

1. Se mide la altura que existe entre el surtidor y la base de la tubería transparente (3 metros)
2. Se acciona la manivela llenando por completo el sistema.
3. Una vez que ha comenzado a salir agua por el surtido se para la manivela activando un cronometro.
4. El frente de la columna de agua llega al inicio de la tubería transparente, parándose el cronometro.

Los datos obtenidos en los experimentos se muestran en la tabla 2 dentro del Anexo I:

Basándonos en los datos anteriores llegamos a las siguientes conclusiones:

$$v_{perdidas} = \frac{altura}{T_{perdidas}}$$

$T_{perdidas} = 8,72$  s (media de los valores obtenidos en los experimentos)

$altura = 3$  m (distancia que separa la base de la tubería transparente a la salida del surtidor)

$$v_{perdidas} = \frac{altura}{T_{perdidas}} = \frac{3}{8,72} = 0.344 \text{ m/s}$$

$$Q_{pe} = 0,344 \cdot 5,685 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9931975 = 0.19 \left[ l/s \right]$$

#### 4.1.4 Velocidad angular crítica

Según se menciona en el apartado de base teórica la velocidad angular crítica se define como la mínima para la cual se extrae agua, es decir, la velocidad angular que aportaría un caudal teórico igual al caudal de pérdidas.

A continuación se desarrollan las formulas con las que se calcula dicha velocidad:

$$Q_{teórico} = \omega \cdot r \cdot (A_T - A_c) \cdot \phi - Q_{pe}$$



$$Q_{teórico} \geq 0 \rightarrow \omega_{cri} \cdot r \cdot (A_T - A_C) \cdot \phi - Q_{Pe} \geq 0$$

$$\omega_{cri} \cdot r \cdot (A_T - A_C) \cdot \phi \geq Q_{Pe}$$

$$\omega_{cri} \geq \frac{Q_{Pe}}{r \cdot (A_T - A_C) \cdot \phi} = \frac{0,19}{0,198 \cdot 5,685 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9931975} = 1,6995 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{cri} = 2 \cdot \pi \cdot f \rightarrow f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$$

$$f_{crit} \geq \frac{1,6995}{2 \cdot \pi} \rightarrow f \geq 0,27 \text{ Hz}$$

#### 4.1.5 Caracterización del freno.

Este apartado toma en consideración conclusiones extraídas del proyecto “Instalación y caracterización de bomba de Mecate con motor eléctrico” actualmente en fase de estudio en la misma cátedra que ampara este proyecto.

Resulta importante acotar el rango de funcionamiento y comprobar la fiabilidad de los datos obtenidos por el sistema de frenado. Para ello se realizan diferentes experimentos aumentando de forma progresiva el valor de la fuerza de arrastre.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en este experimento.

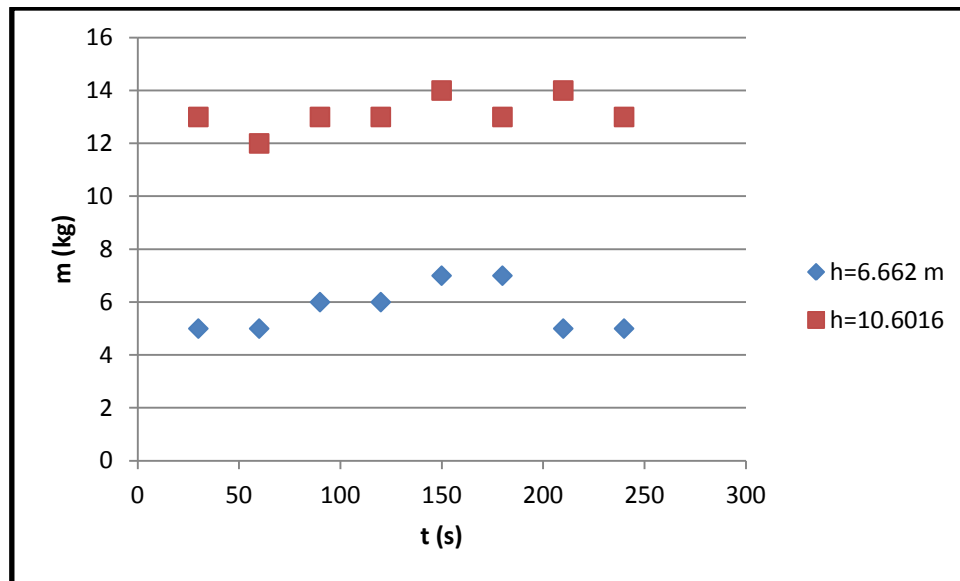
##### *Rango de funcionamiento*

Para valores de fuerza de arrastre que sobrepasen los 18 kilogramos el sistema de frenado se vuelve muy inestable, introduciendo grandes oscilaciones y sobrecalentando el disco de freno. Debido a todo esto se ha decidido no realizar pruebas de simulación por encima de este rango.

##### *Valor indicado frente a tiempo.*

Para analizar la variación del valor indicado por el dinamómetro se realizan dos pruebas. Las pruebas consisten en poner en funcionamiento el sistema con el freno accionado (valores de 5 y 13 kg).

Tomando datos y representándolos en la siguiente gráfica:



**Ilustración 28** Valor indicado por el  
dinamómetro frente al tiempo

Como se puede observar en la gráfica anterior el valor indicado por el dinamómetro oscila siempre en un pequeño rango.

#### *Tiempo de vida estimado.*

Medidas las horas de uso del freno y el desgaste mostrado se llega a la conclusión de que este presenta un tiempo de vida útil de entre 15-20 horas. La tolerancia que presenta estos límites es debido a que el freno se usa para diferentes intensidades, variando el resultado final en función del par de arrastre utilizado durante el tiempo de vida.

#### **4.1.6 Análisis fuerzas de rozamiento Manivela**

En los sucesivos apartados se procede a analizar la fuerza de rozamiento y buscar los parámetros de los que depende.

El primer proceso realizado en este apartado ha consistido en una búsqueda de las causas de las fuerzas de rozamiento que presenta el sistema:

- Rozamiento del eje con los cojinetes de madera.
- Rozamiento de la cuerda con la botella.
- Rozamiento de los pistones con las paredes internas de la tubería.

Debido a la dificultad que supone desarrollar una expresión matemática que cuantifique el valor teórico del par de rozamiento, se decide obtener los valores de forma experimental.

El proceso seguido para obtener los valores del momento producido por las fuerzas de rozamiento consta de los siguientes pasos:

- 1- La manivela se coloca en posición horizontal, una vez colocado en esta posición se engancha una báscula digital donde se cuelga un cubo.
- 2- Posteriormente se añade agua de forma progresiva al cubo, parando este proceso cuando el peso del agua sea suficiente para mover el sistema.
- 3- Finalmente apuntamos los datos obtenidos tras varias repeticiones.



**Ilustración 29 Proceso de cálculo del par de rozamiento**

El valor de la masa obtenido de forma experimental con el que se empezaba a mover la manivela es de: 0,67Kg. Este dato implica que el valor del par de rozamiento es:

$$M_{frenada} = 0,67 \cdot 9,8 \cdot 0,27 = 1,773 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### 4.1.7 Análisis fuerzas de rozamiento Pedales

Repitiendo el mismo proceso seguido en el apartado anterior se calcula el valor del par de rozamiento para el sistema formado por la bomba de mecate utilizando los pedales de la bicicleta:

$$M_{frenada} = 0,75 \cdot 9,8 \cdot 0,27 = 1,985 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### 4.1.8 Análisis de parámetros que influyen en el par de rozamiento

A continuación se plantean los parámetros que hacen variar el valor del rozamiento y se procede a cuantificarlo. Los parámetros que influyen en el par de rozamiento son:

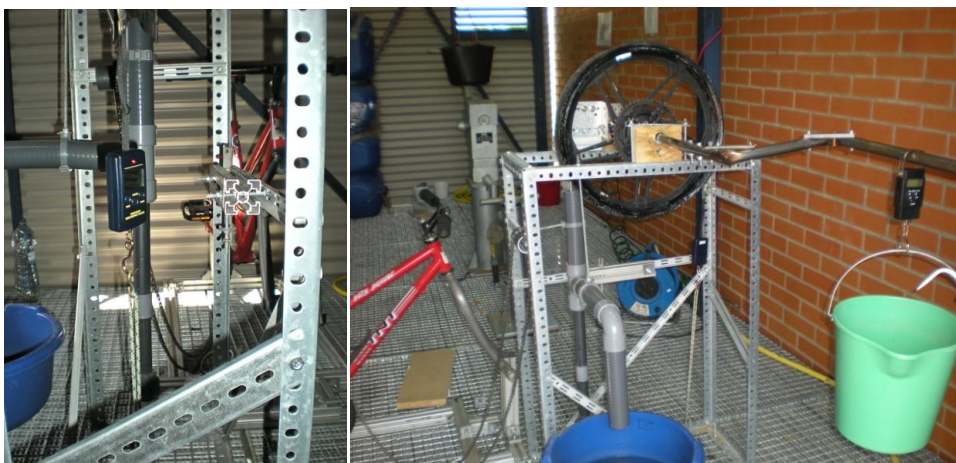
- Tensión de la cuerda.
- Número de pistones (que a su vez depende de la altura).

##### *Relación entre fuerza de rozamiento y tensión de la cuerda*

La tensión de la cuerda influye en el valor tanto del rozamiento del eje con los cojinetes como en el rozamiento de la cuerda con la botella. Para cuantificar la relación que existe entre la tensión de la cuerda y el par de rozamiento se realiza un experimento que consta de los siguientes pasos:

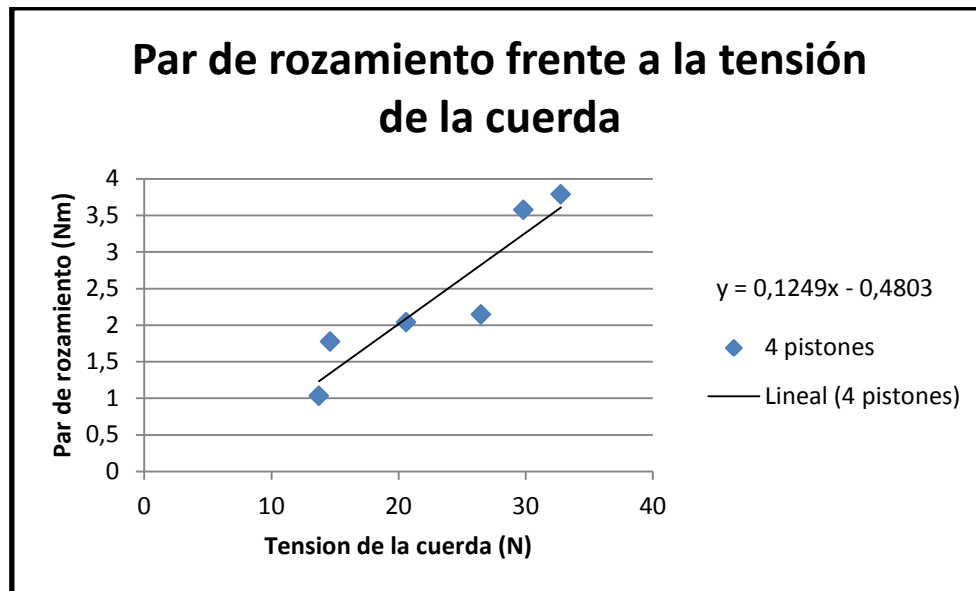
Se instala un dinamómetro electrónico en la cuerda, sabiendo de esta forma la tensión a la que se encuentra la cuerda.

- Posteriormente se coloca la manivela en posición horizontal, una vez situada en esta posición se engancha una báscula digital donde colgamos un cubo.
- Posteriormente se añade agua de forma progresiva al cubo, parando este proceso cuando el peso del agua sea suficiente para mover el sistema.
- Finalmente, se repite este proceso cambiando la tensión de la cuerda.



**Ilustración 30 Proceso de cálculo del par de rozamiento  
en función de la tensión de la cuerda**

Los datos obtenidos en este experimento muestran una relación creciente entre la tensión de la cuerda y la fuerza necesaria para vencer el par de rozamiento. Esto se puede observar en el siguiente grafico:

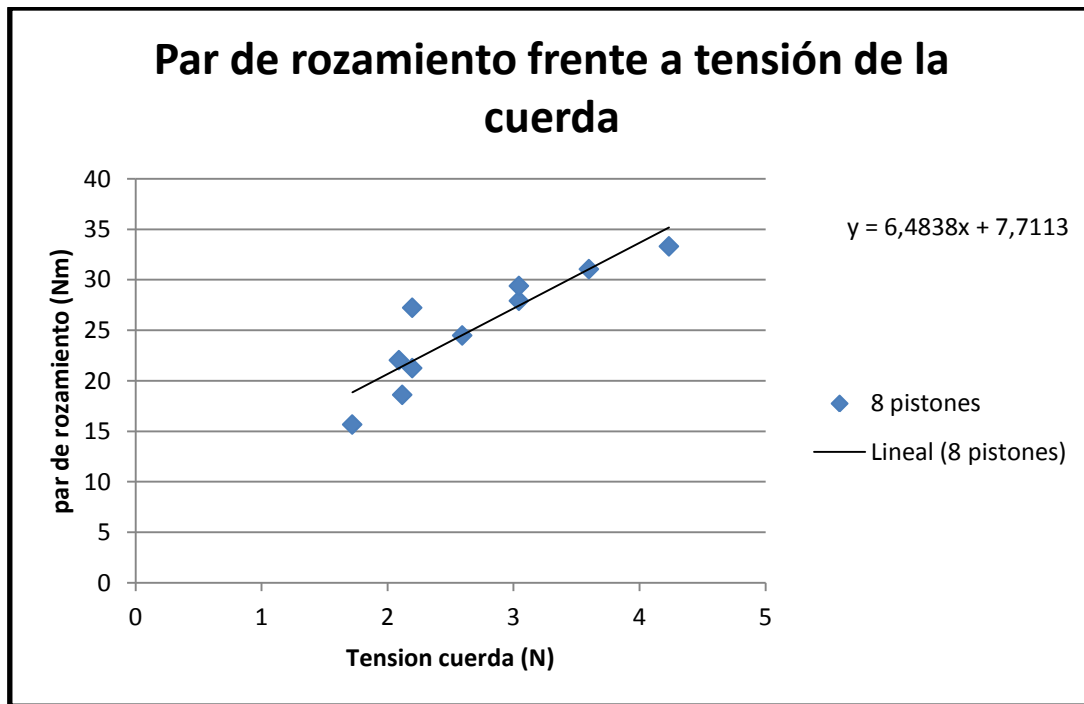


**Ilustración 31 Par de rozamiento frente a la tensión de la cuerda (Cuerda con 10 pistones)**

### ***Relación entre fuerza de rozamiento y número de pistones***

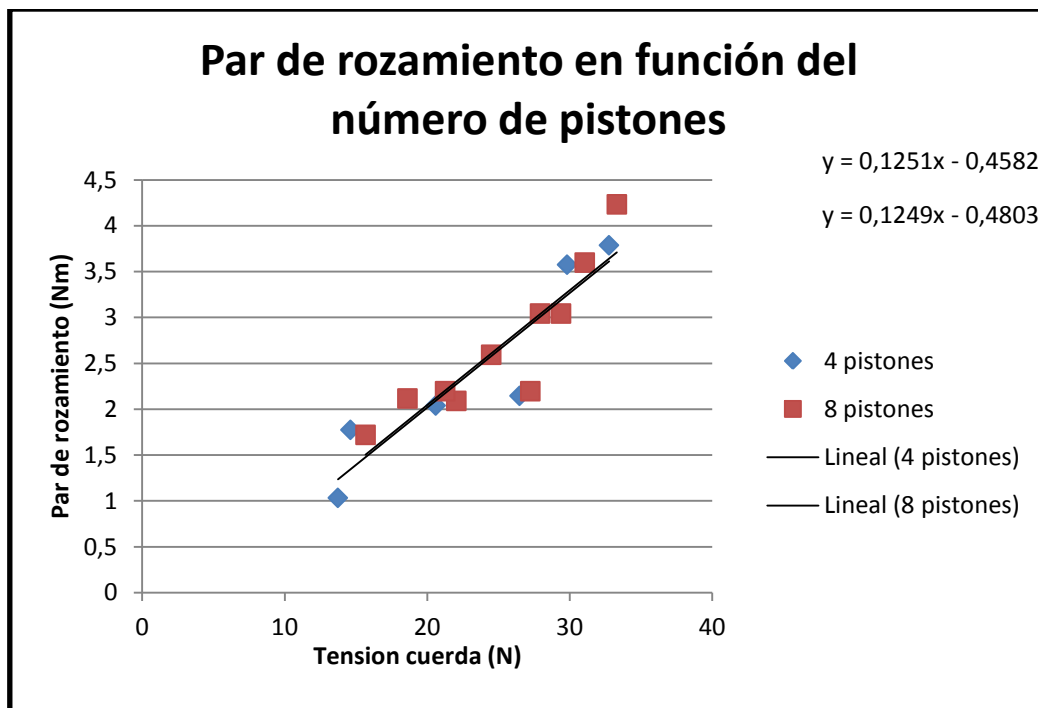
Otro de los parámetros que influyen en el valor del par de rozamiento es el número total de pistones que están en contacto con la cara interior de la tubería. Este dato aumenta de forma directa con la altura.

Para valorar la influencia del número de pistones en el par de rozamiento se repite el experimento del apartado anterior, esta vez la separación entre pistones es de 0,5 m lo cual implica que en el interior de la tubería tendremos 8 pistones. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4, Anexo I y su correspondiente gráfica:



**Ilustración 32 Par de rozamiento frente a la tensión de la cuerda (cuerda con 20 pistones)**

A continuación se muestra una gráfica donde se compara los resultados obtenidos para los dos experimentos llevados a cabo:



**Ilustración 33 Comparaciones de datos de par de rozamiento entre**

**Cuerda con 10 pistones y cuerda con 20 pistones**

En la ilustración 32 se observa que la influencia del número de pistones en el par de rozamiento es prácticamente despreciable, esta afirmación nos conduce a las siguientes conclusiones:

- La fuerza de rozamiento depende fundamentalmente de la tensión de la cuerda.
- El número de pistones no influye de forma determinante en el valor del par de rozamiento.
- Las fuerzas de rozamiento se producen fundamentalmente en el eje superior y en la zona de la botella, siendo despreciable el rozamiento de los pistones en la tubería.

#### 4.1.9 Caudal extraído en función de la altura (usando manivela).

Un parámetro de gran utilidad es el caudal extraído, esto es así debido al interés que supone el análisis de la variación del caudal para diferentes alturas.

Este estudio aporta información necesaria para indicar los límites de funcionamiento lógicos en el uso de una bomba de mecate.

En una primera serie de medidas se somete a dos usuarios a realizar pruebas de extracción de agua (simulando diferentes alturas) haciendo uso de la manivela y de la bicicleta. Los usuarios cumplen las siguientes características:

	edad		sexo	
	20-25	50-55	varón	hembra
usuario 1	x		x	
usuario 2	x			x

Los datos mostrados en las siguientes graficas (incluidos en el Anexo I, tablas 5 y 6) muestran la media de las medidas obtenidas, obteniéndose de experimentos repetitivos para cada condición (variando entre 3 y 6 repeticiones por dato) Consiguiendo de esta forma otorgar mayor fiabilidad a los datos estudiados.



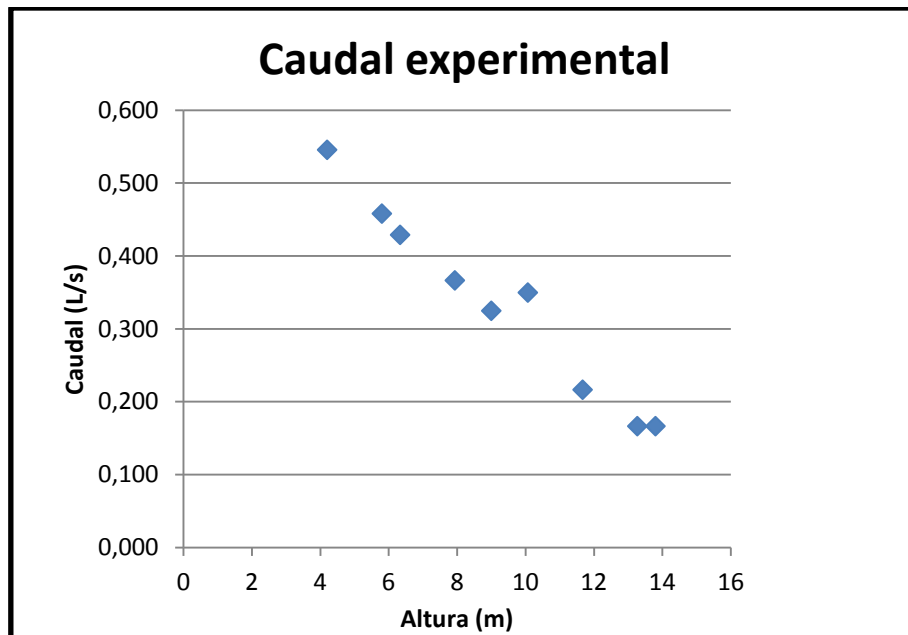


Ilustración 34 Datos de caudal frente a altura de Usuario 2 (usando manivela)

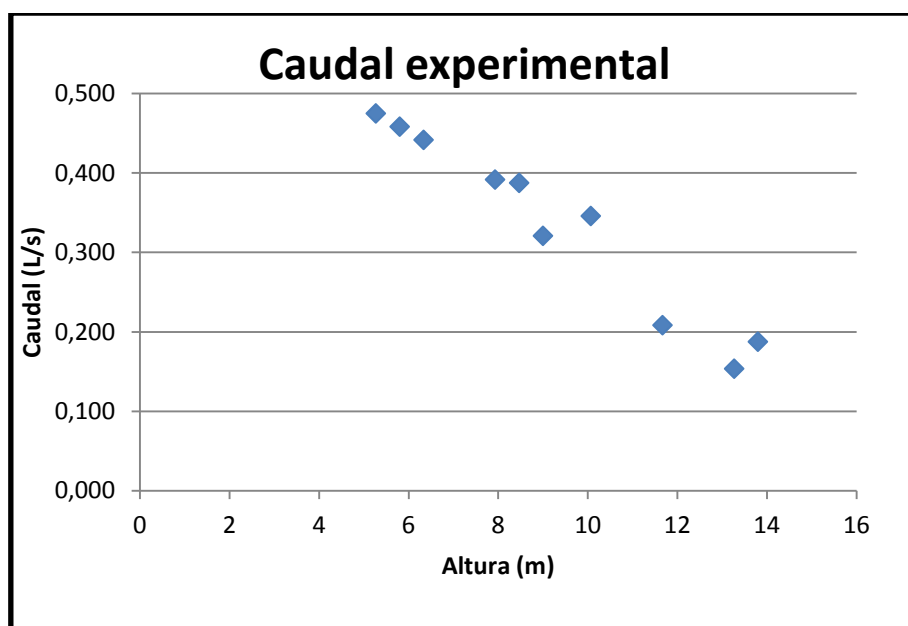


Ilustración 35 Datos de caudal frente a altura de usuario 1 (usando manivela)

Como se puede observar en los datos mostrados en la gráfica el caudal extraído disminuye en función del valor de la altura.

El uso de la bomba de mecate resulta ineficiente para alturas mayores a 15 metros, ya que el esfuerzo requerido es grande y el caudal extraído es pequeño. Para conseguir extraer agua a profundidades mayores a 15 metros es aconsejable la instalación de una bicicleta.

#### 4.1.10 Caudal extraído en función de la altura (usando bicicleta).

Las siguientes graficas representan los datos considerados en el Anexo I (tablas 7 y 8).

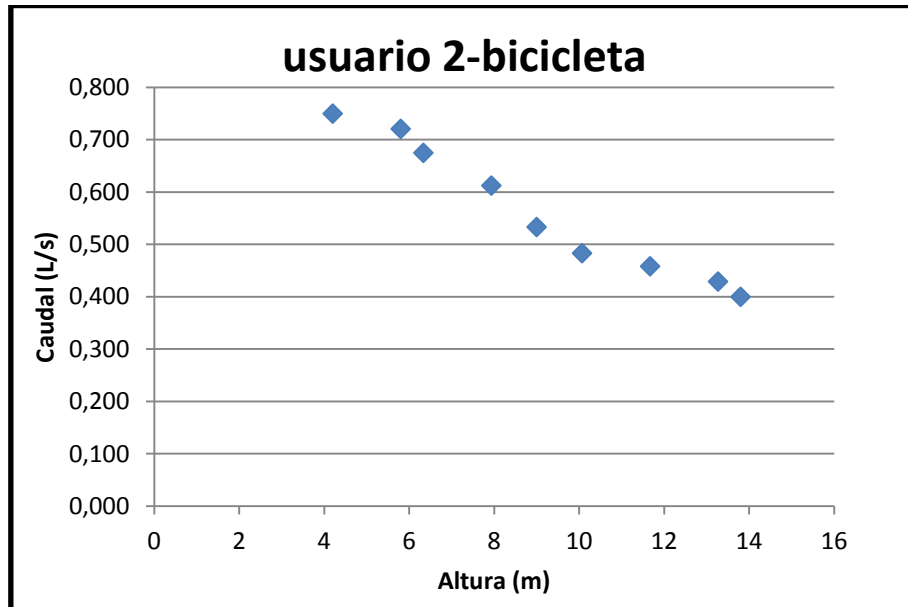


Ilustración 36 Datos de caudal frente altura Usuario 2 (usando bicicleta)

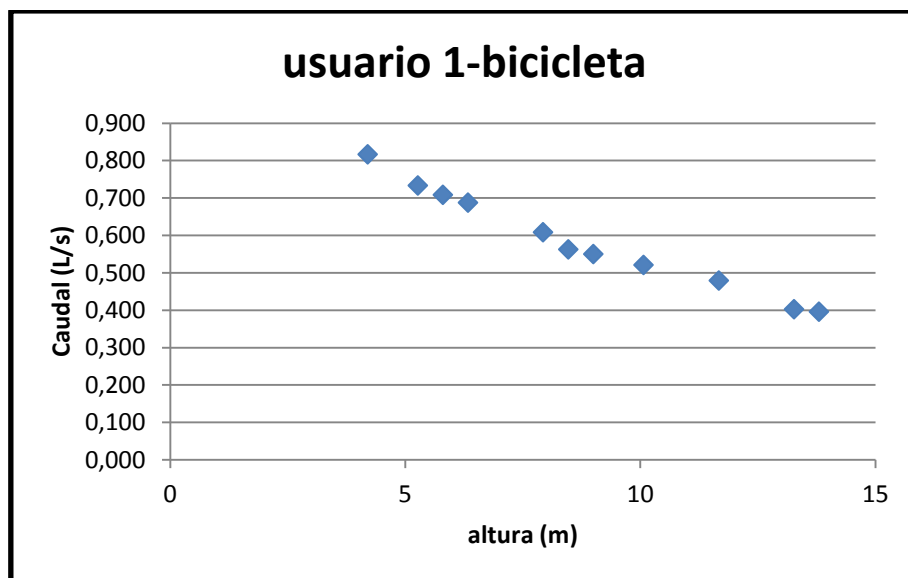


Ilustración 37 Datos de caudal frente a altura de usuario 1 (usando bicicleta)

#### 4.1.11 Comparación resultados teóricos y experimentales

Para comprobar si el modelo planteado funciona correctamente se procede a realizar una comparación de resultados teóricos frente a experimentales.

Los datos teóricos se calculan haciendo uso de la expresión desarrollada en el punto “Caudal teórico” dentro del apartado “Base teórica”. Los valores teóricos se encuentran en las tablas mostradas en el Anexo I (tablas de la 9 a 12) y las graficas se encuentran en el Anexo II.

##### *Manivela.*

En las siguientes gráficas se muestra tanto el valor del caudal teórico como el caudal obtenido en las diferentes pruebas realizadas con la manivela.

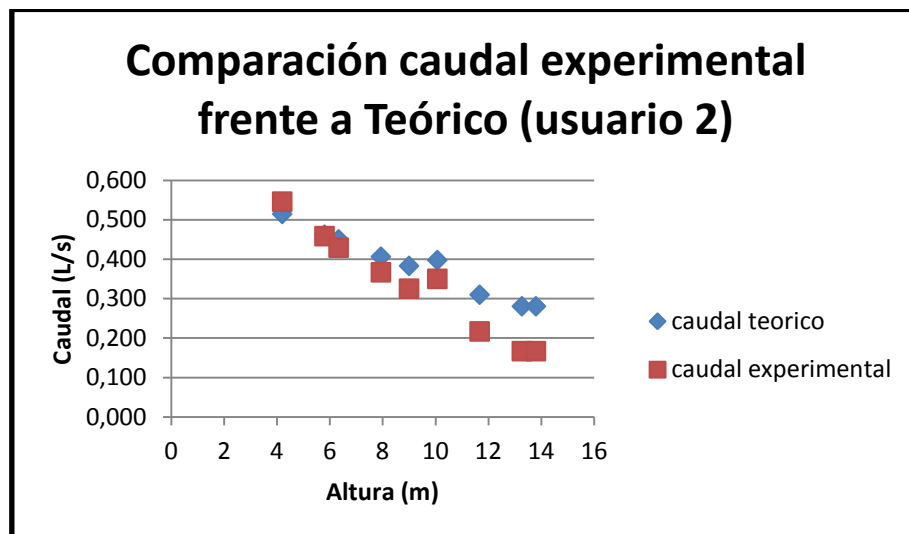


Ilustración 38 Comparación caudal teórico frente a experimental  
(usando manivela)

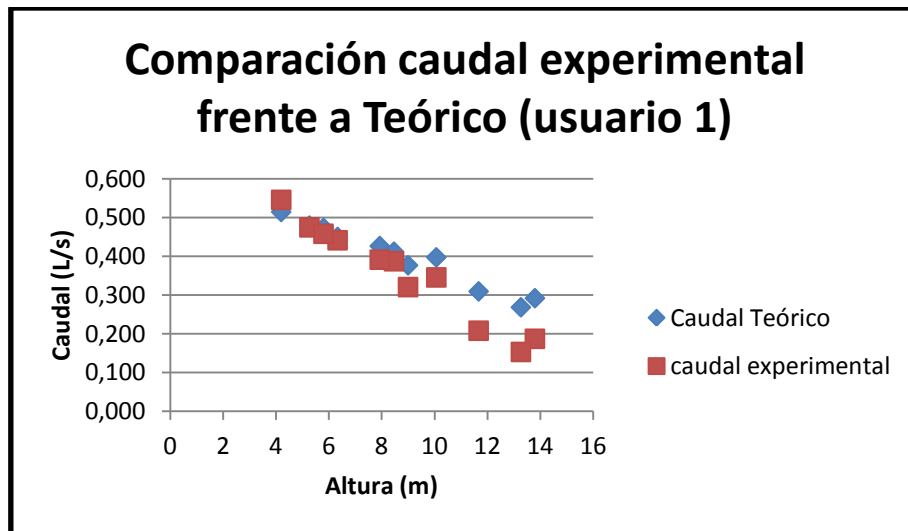


Ilustración 39 Comparación caudal teórico frente a experimental  
(usando manivela)

Resulta interesante analizar la desviación existente entre el caudal extraído y el caudal teórico en función de la altura. Para estudiar si el modelo teórico planteado es correcto o presenta desviaciones.

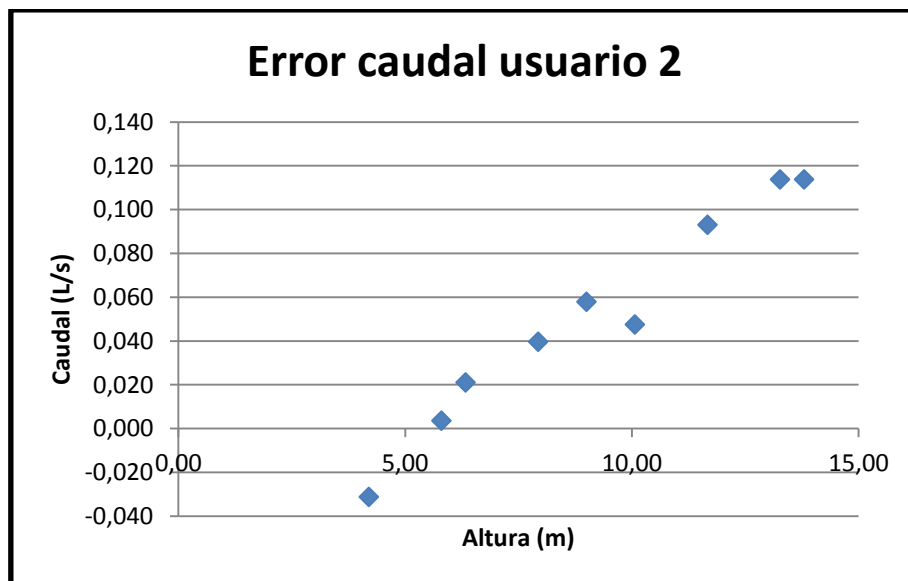


Ilustración 40 Diferencia entre caudal  
teórico y experimental (usando manivela)

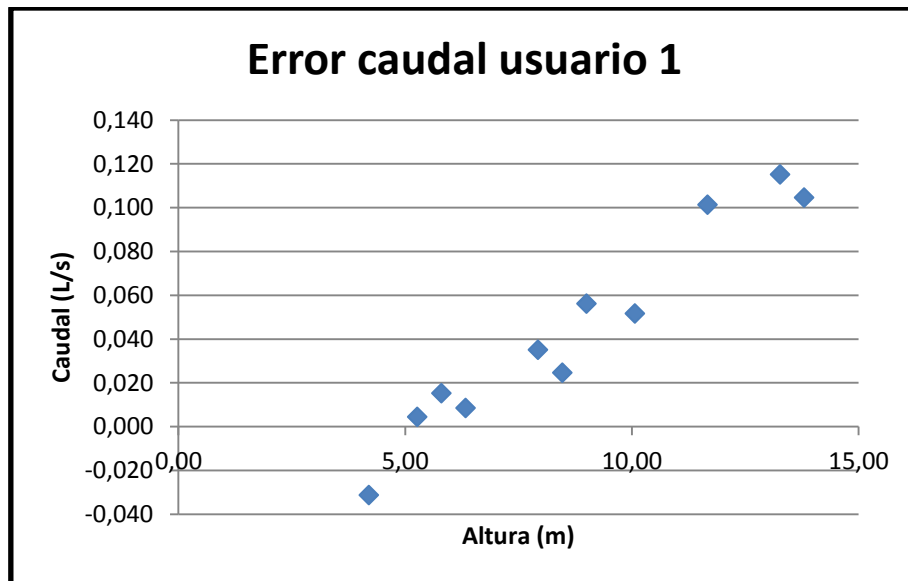


Ilustración 41 Diferencia entre caudal

teórico y experimental (usando manivela)

**Bicicleta.**

Al igual que en el apartado anterior se procede a comparar el caudal teórico frente al caudal obtenido en los distintos experimentos llevados a cabo con la bicicleta, posteriormente se muestran las desviaciones existentes entre los datos teóricos y lo experimentales:

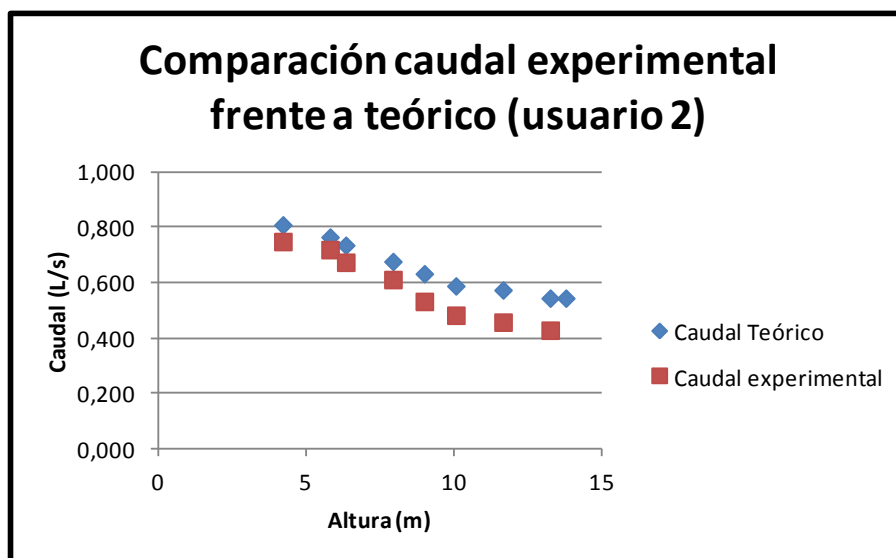
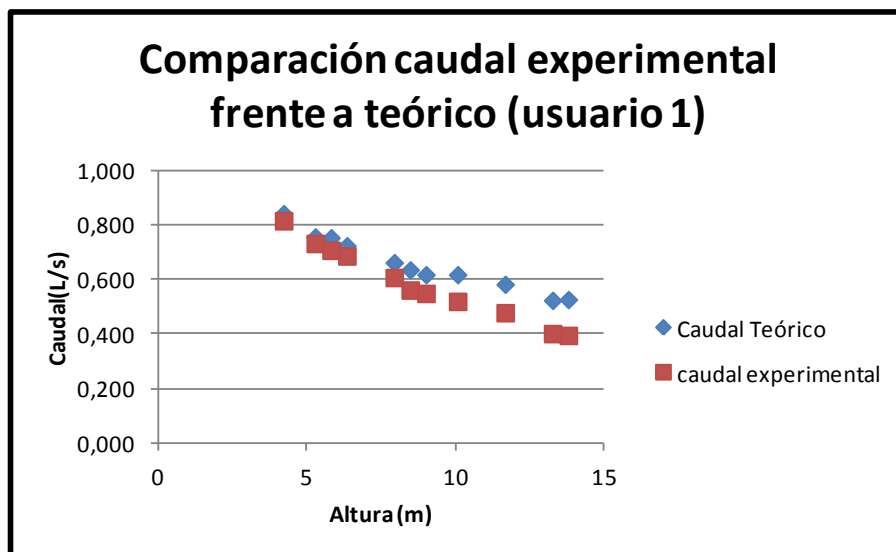
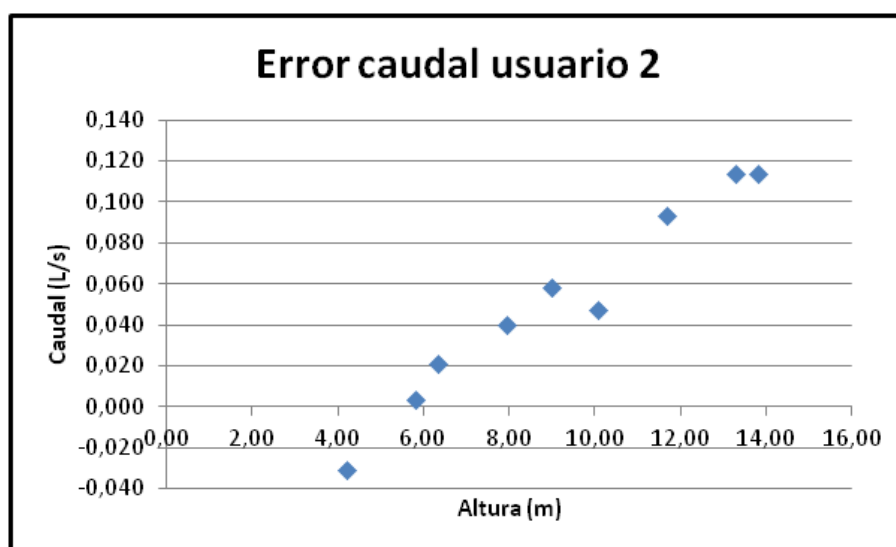


Ilustración 42 Comparación caudal teórico frente a experimental (usando bicicleta)



**Ilustración 43 Comparación caudal teórico frente a experimental (usando manivela)**



**Ilustración 44 Diferencia entre caudal teórico y experimental (usando bicicleta)**

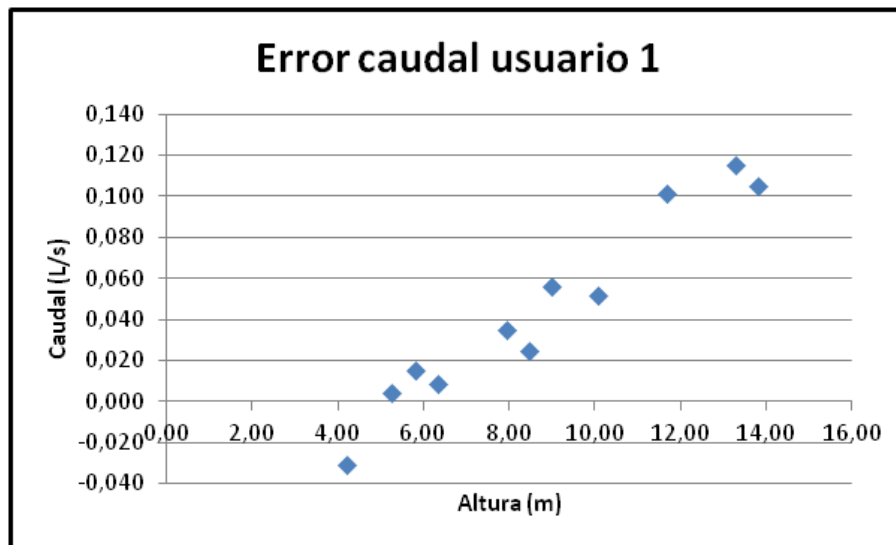


Ilustración 45 Diferencia entre caudal  
teórico y experimental (usando bicicleta)

Como se puede observar en los últimos gráficos la diferencia existente entre los caudales teóricos y los caudales experimentales se incrementa de forma directa con la altura.

Debido a esto se comienza un proceso de análisis con el objetivo de localizar el origen de la desviación.

Después de realizarse diferentes pruebas se llega a la conclusión de que el planteamiento de un caudal de pérdidas constante no es cierto, intuyendo que el caudal de pérdidas varía con la velocidad angular.

En los siguientes apartados se aborda esta cuestión analizando el caudal de pérdidas en función de la frecuencia y volviendo a analizar los resultados teóricos frente a los experimentales.

**4.1.12 Caudal de pérdidas en función de la frecuencia.**

Dada la situación descrita anteriormente se lleva a cabo un análisis del valor del caudal de pérdidas en función de la velocidad angular.

Para conseguir dicha relación se realiza lo siguiente:

$$\eta_v = \frac{Q_{r\ e}}{Q_{i\ t}}$$

Donde:

$\eta_v$  = *rendimiento volumétrico*

$Q_{r\ e}$  = *caudal real experimental*

$Q_{i\ t}$  = *caudal ideal teórico*

$Q_{i\ t} = \omega R A \phi - Q_p$

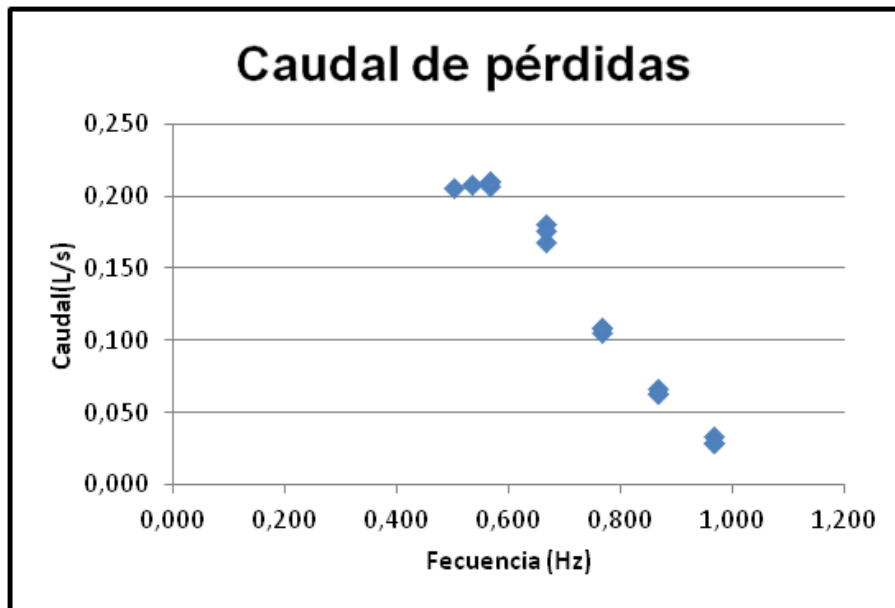
$Q_p$  = *caudal de pérdidas*

Para conseguir despejar el caudal de pérdidas se realiza la suposición de que el rendimiento ( $\eta_v$ ) es ideal, es decir, vale 1. De esta forma obtenemos la siguiente expresión de donde se despeja los diferentes valores del caudal de pérdidas:

$$Q_p = \omega R A \phi - \frac{Q_{r\ e}}{\eta_v} \left[ l/s \right]$$

Partiendo de la ecuación anterior y haciendo uso de diferentes valores experimentales se obtiene la tabla (Anexo I, tabla 13) y la siguiente gráfica:

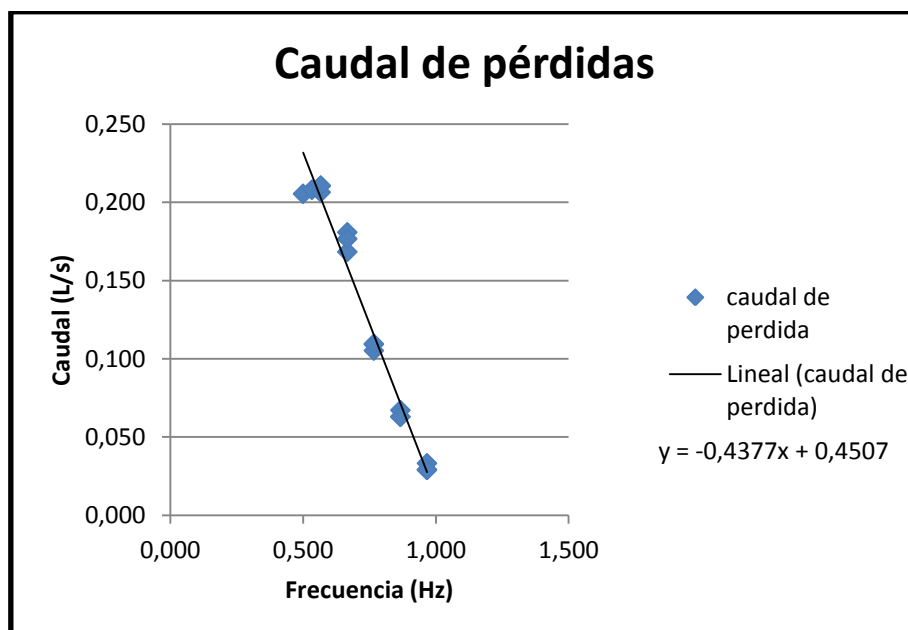




**Tabla 2 Caudal de pérdidas**

frente a frecuencia

En la gráfica anterior se puede observar como varia el caudal de pérdidas para distintos valores de frecuencia. Como el objetivo es analizar la influencia del caudal de perdidas en los experimentos llevados a cabo en los apartados anteriores, acotamos el estudio a frecuencias mayores a 0,5 Hz. Obteniéndose los siguientes resultados:



**Ilustración 46 Caudal de pérdidas frente a frecuencia**

(frecuencias mayores a 0,5 Hz)

Basándose en los resultados anteriormente expuestos se llega a la siguiente expresión:

$$Q_{pd} = -0,4377f + 0,4507 \text{ Si } 0,5 < f < 1$$

Donde:

$$f = \text{frecuencia}$$

Para frecuencias mayor a 1 se considera el caudal de perdidas  $\approx 0,01$ .

Para frecuencias menores de 0,5 Hz el sistema se vuelve muy sensible, oscilando alrededor del valor del caudal de pérdidas estáticas. Debido a esto y a que todos los datos del proyecto presentan una frecuencia mayor a 0,5 Hz no se procede a analizar este intervalo.

#### 4.1.13 Caudal teórico (con caudal de pérdidas variable):

Basándose en las conclusiones extraídas en el apartado anterior se decide cambiar el modelo teórico. En esta segunda aproximación el caudal de pérdidas deja de ser un valor fijo, ya que como se ha demostrado en el apartado “caudal de pérdidas en función de la frecuencia” el caudal de perdidas varía en función de la velocidad angular. La nueva expresión es:

$$Q_{teórico} = \omega \cdot r \cdot (A_T - A_c) \cdot \frac{(H_{FA} \cdot A_T - V_{piston})}{H_p \cdot A_T} - Q_{pd} \left[ m^3/s \right]$$

Donde:

$$Q_{pd} = \text{caudal de perdidas dinámico}$$

$$Q_{pd} = -0,4377f + 0,4507 \text{ Si } 0,5 < f < 1$$

$$Q_{pd} = 0,01 \text{ Si } f > 1$$

Los nuevos resultados teóricos se encuentran en las tablas 13-16 del Anexo I.

#### 4.1.14 Comparación de resultados teóricos frente a experimentales (incluyendo caudal de pérdidas variable).

Una vez que se han calculado los nuevos valores del caudal teórico, se procede a realizar una comparación entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos teóricos.

##### *Manivela.*

En este punto se comparan los datos teóricos frente a los experimentales, basados en el uso de la manivela:

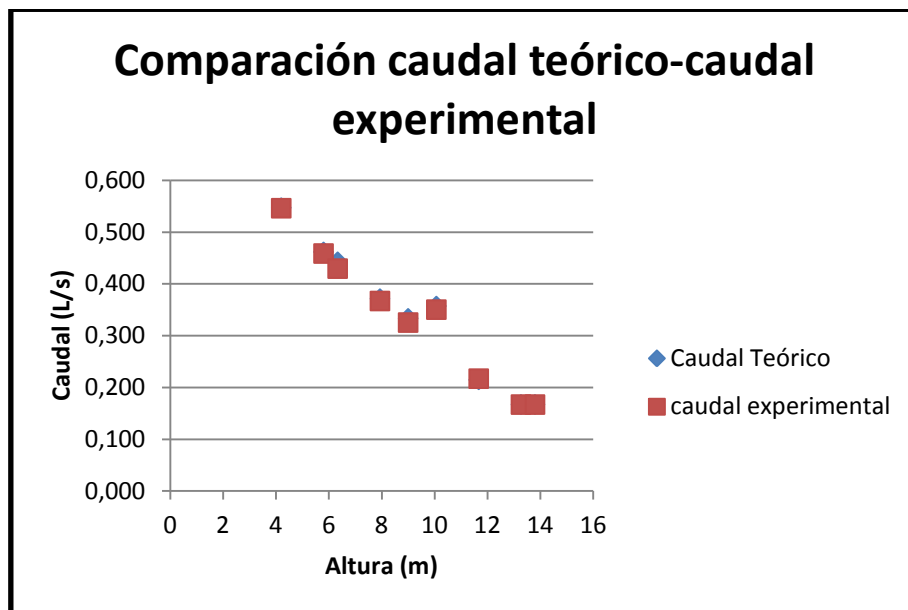
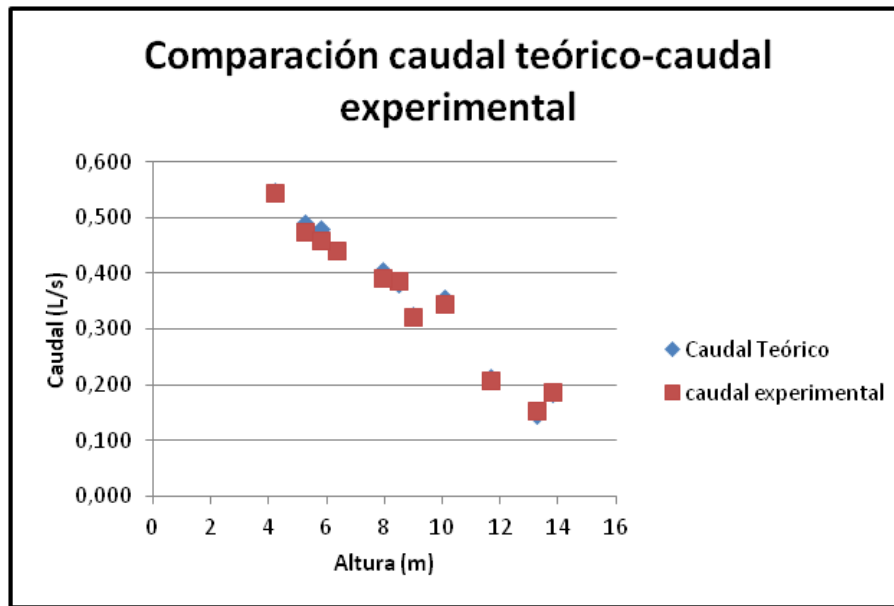
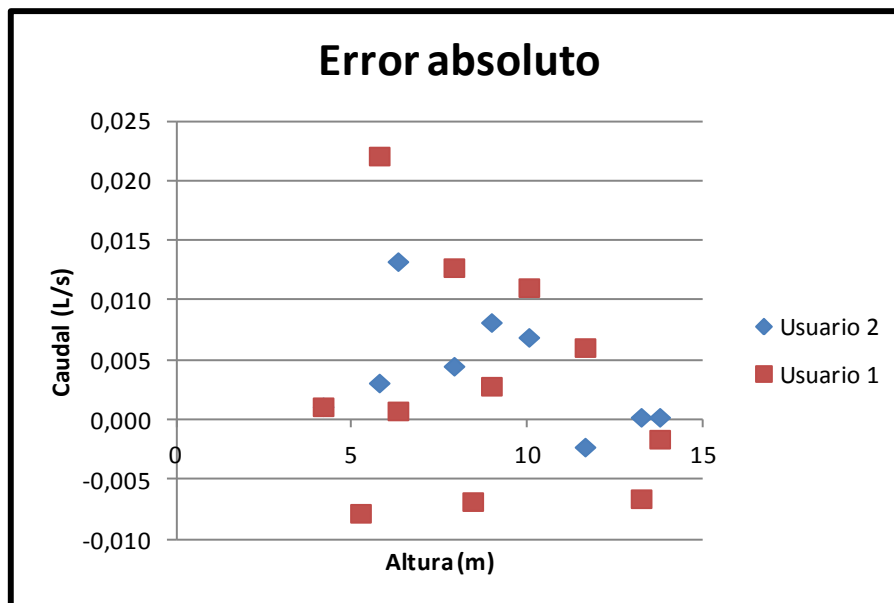


Ilustración 47 Comparación caudal teórico frente a caudal experimental (usando manivela)



**Ilustración 48 Comparación caudal teórico frente a caudal experimental (usando manivela)**

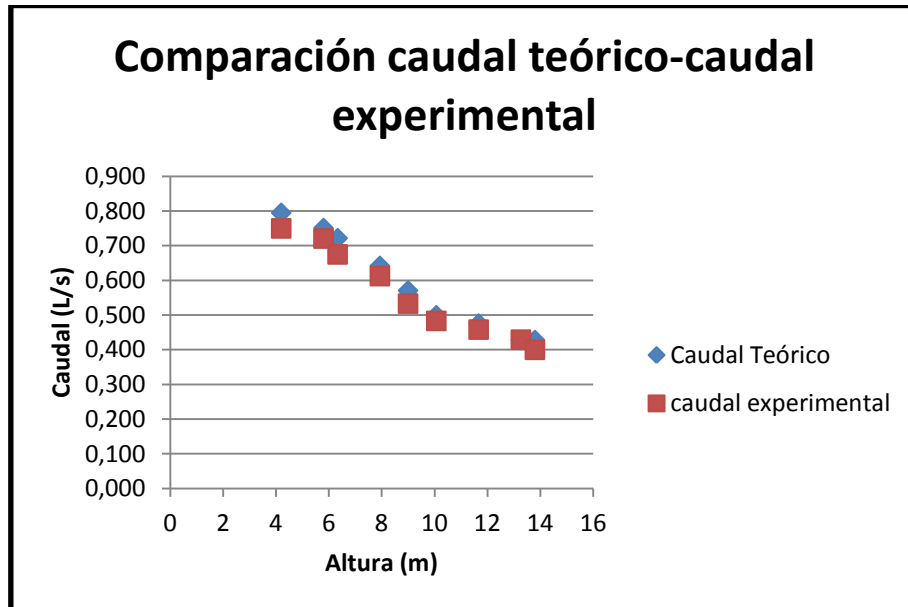
En las siguientes graficas se muestra la diferencia existente entre el caudal teórico y el caudal experimental.



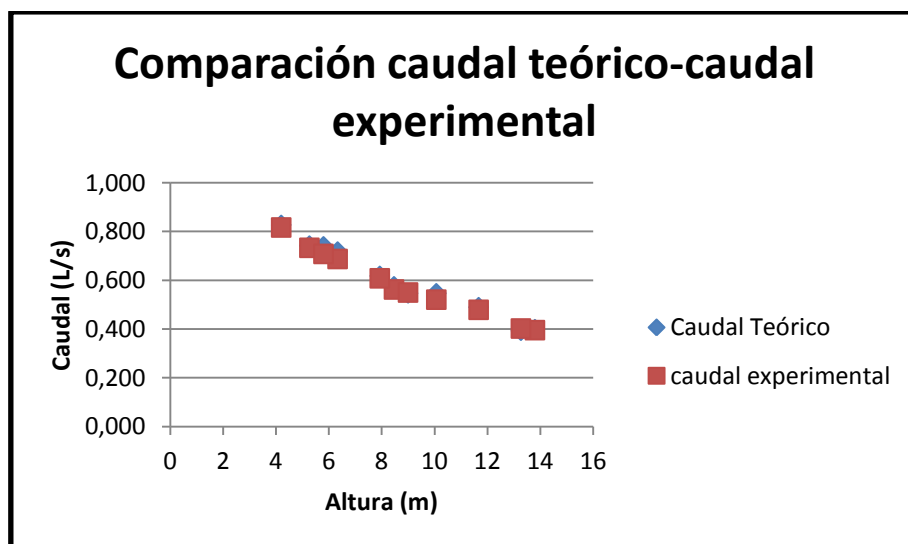
**Ilustración 49 Diferencia entre caudal teórico y caudal Experimental (usando manivela)**

**Bicicleta**

En este punto se comparan los datos teóricos frente a los experimentales, basados en el uso de la Bicicleta:

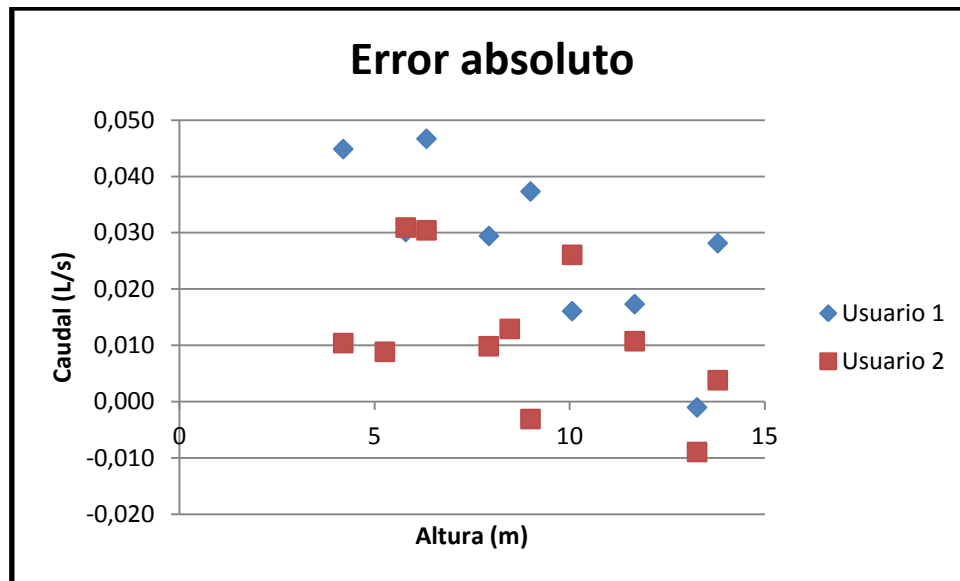


**Ilustración 50** Comparación caudal teórico frente a caudal experimental  
(usando Bicicleta)



**Ilustración 51** Comparación caudal teórico frente a caudal experimental  
(usando Bicicleta)

Al igual que en el apartado anterior se procede a comparar las diferencias existentes entre el caudal teórico y el experimental.

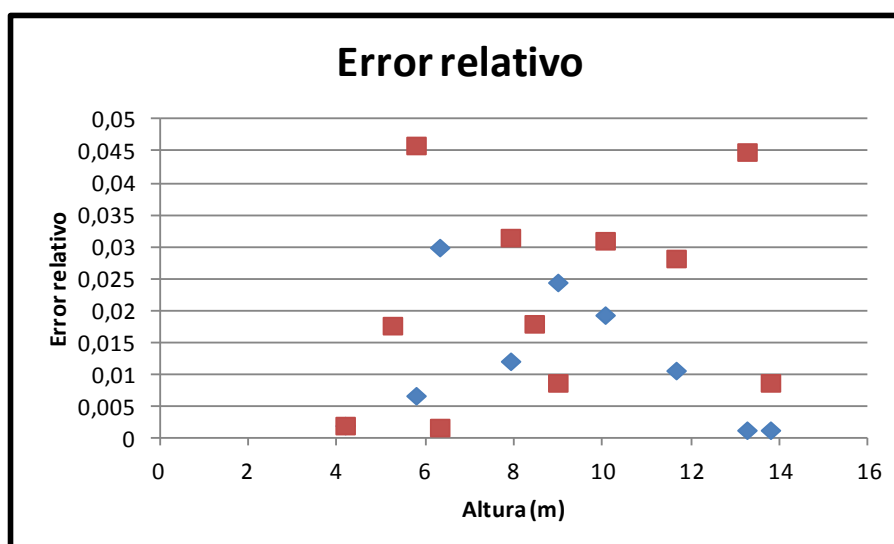


**Ilustración 52 Diferencia entre caudal teórico y caudal Experimental  
(usando bicicleta)**

#### 4.1.15 Error relativo

En este apartado se analiza de forma porcentual la desviación existente entre el caudal experimental y el caudal teórico.

*Manivela:*



**Ilustración 53 Error relativo**

*Bicicleta:*

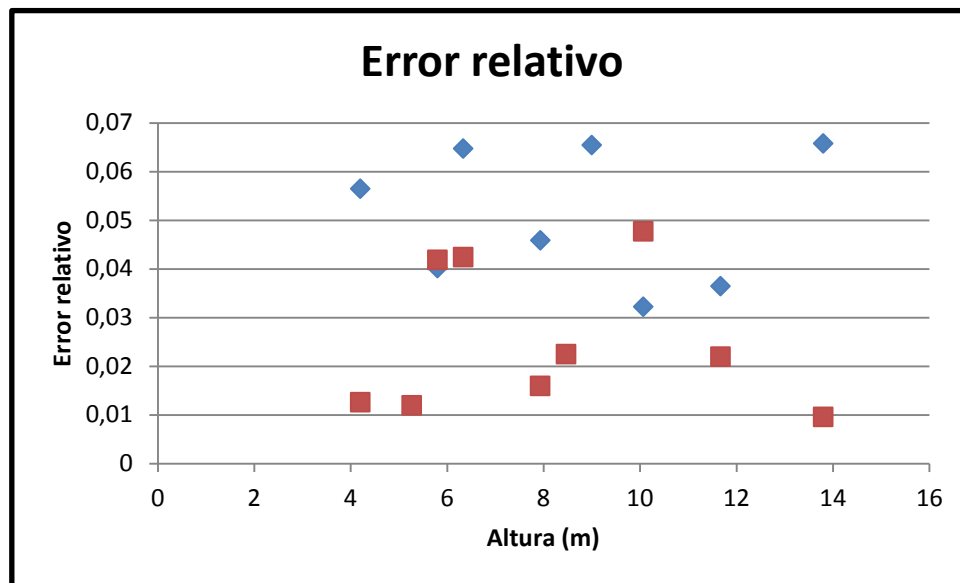


Ilustración 54 Error relativo

## 4.2 Caracterización fisiológica

Para realizar la caracterización fisiológica del uso de la bomba de mecate se realizan diferentes pruebas, analizando las diferentes variables que influyen en el uso de la instalación.

### 4.2.1 Primera aproximación

En una primera fase se procede a analizar el conjunto de pruebas realizadas en los apartados anteriores, el objetivo del análisis es encontrar las variables que influyen de forma determinante en los resultados.

### 4.2.2 Variación de la frecuencia frente al tiempo.

A continuación se toma en consideración datos extraídos del proyecto “Instalación y caracterización de bomba de Mecate con motor eléctrico” actualmente en fase de estudio en la misma cátedra que ampara este proyecto.

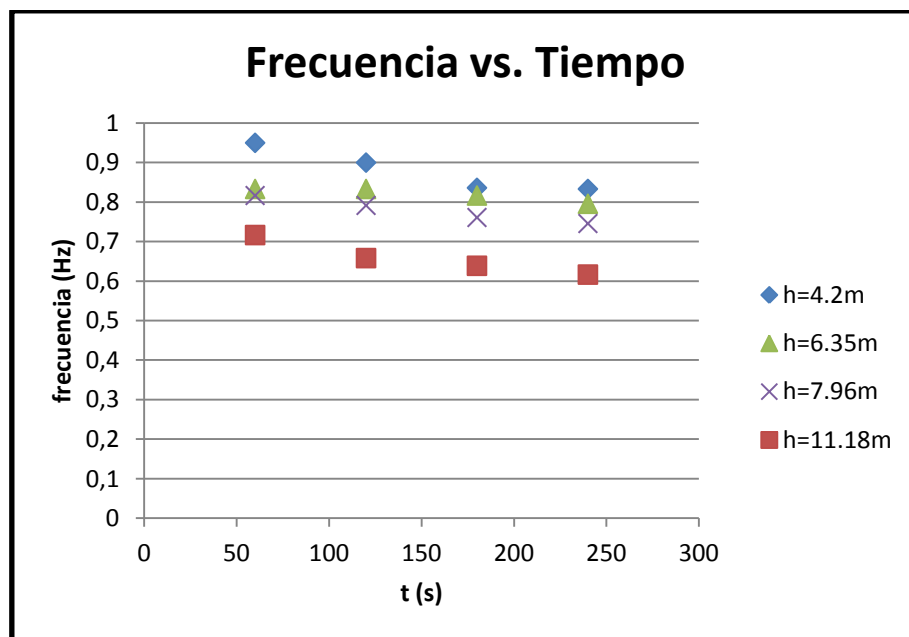
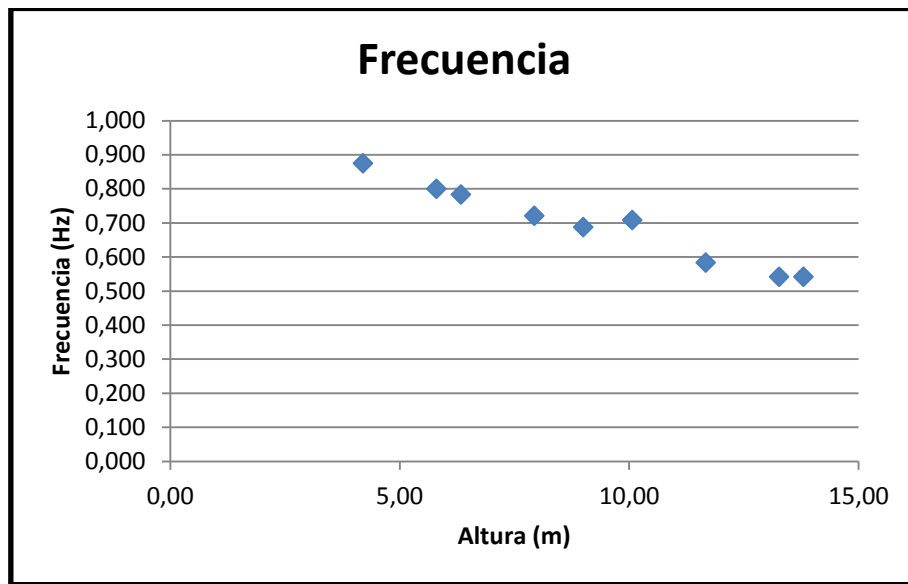


Ilustración 55 Frecuencia frente a tiempo  
(manivela)



#### 4.2.3 Variación de la frecuencia frente a la altura.

Al igual que en el apartado anterior haciendo uso de los datos obtenidos por Usuario 2 Madrid se realiza la siguiente gráfica, donde se muestra la influencia que tiene la altura en la frecuencia:



**Ilustración 56 Frecuencia para diferentes alturas  
(manivela)**

#### 4.2.4 Variación de la frecuencia del Pedaleo frente al tiempo.

Por otro lado se analizan datos obtenidos haciendo uso de la bicicleta, al igual que con la manivela el objetivo de este primer análisis es conseguir un primer acercamiento a la realidad obteniendo a grandes rasgos la influencia tanto del tiempo como de la altura en la velocidad de pedaleo.

A continuación se muestra una gráfica donde se observa como varia la frecuencia de pedaleo en función del tiempo para distintas alturas:

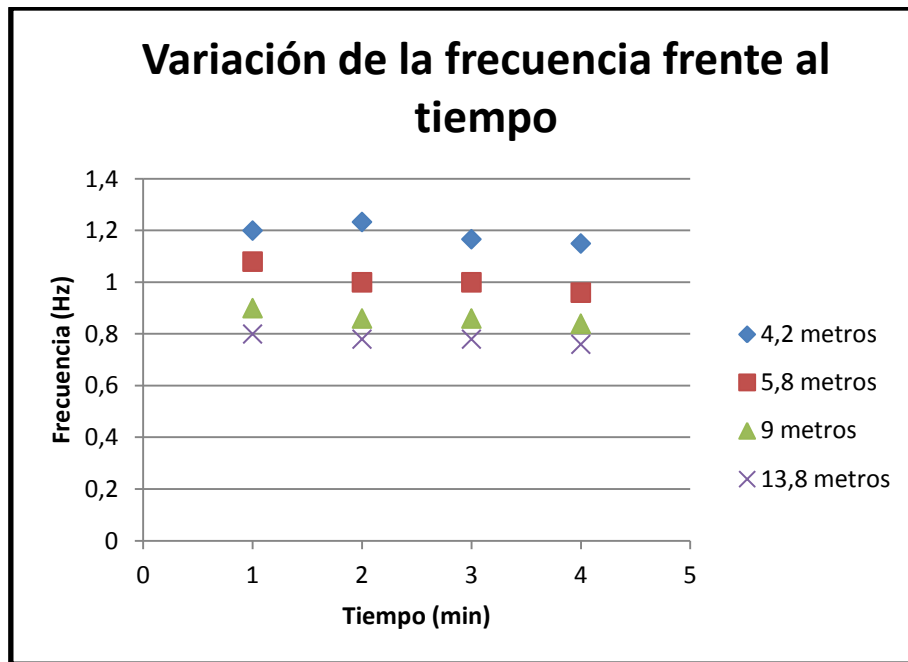


Ilustración 57 frecuencia frente a tiempo

(bicicleta)

#### 4.2.5 Variación de la frecuencia de pedaleo frente a la altura.

La gráfica siguiente muestra un conjunto de datos obtenidos realizando pequeños incrementos en la altura simulada:

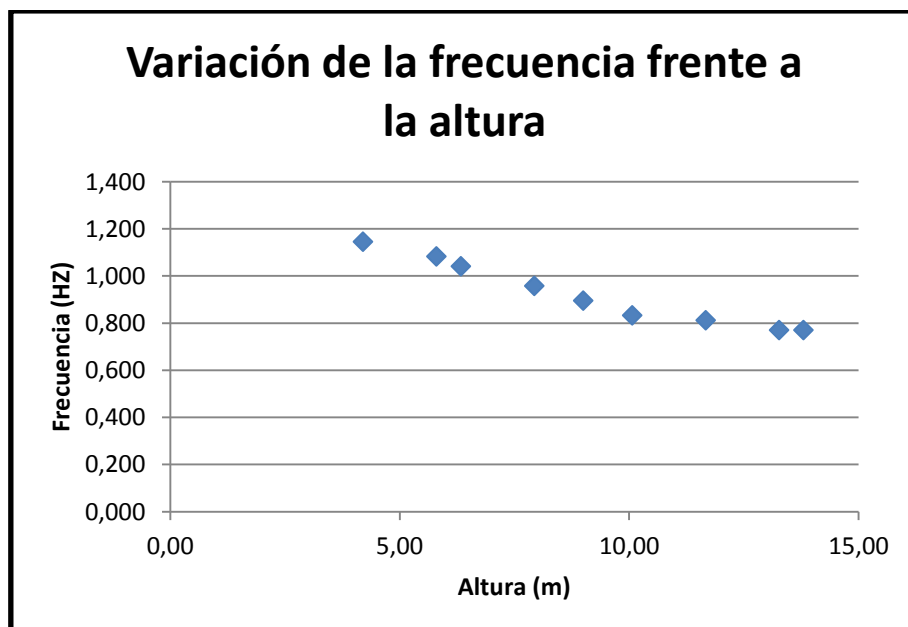


Ilustración 58 Frecuencia frente a altura

(bicicleta)

De este primer conjunto de experimentos se sacan las siguientes conclusiones:

1º El incremento de la altura presenta una relación inversa respecto a la velocidad angular.

2º Para la duración de las pruebas realizadas (4 minutos) el tiempo no es un factor que influya de forma determinante en la velocidad angular.

#### 4.2.6 Análisis general

##### *Descripción usuarios*

La prueba se realiza a un grupo de 10 personas, que se dividen de la siguiente manera:

- Un grupo de 4 personas (2 personas de sexo masculino y 2 de sexo femenino) que presentan una edad comprendida entre los 50-55 años.
- El otro grupo de personas poseen una edad comprendida entre los 20-25 años, y estaba compuesto de 3 varones y 3 mujeres.

En la siguiente tabla se muestra el sexo y el intervalo de edad para cada uno de los voluntarios:

	edad		sexo	
	20-25	50-55	varón	hembra
usuario 1	x		x	
usuario 2	x			x
usuario 3	x		x	
usuario 4	x			x
usuario 5	x		x	
usuario 6	x			x
usuario 7		x	x	
usuario 8		x		x
usuario 9		x	x	
usuario 10		x		x

**Tabla 3 Descripción usuarios**

Con el fin de alcanzar una caracterización más completa se han realizado dos tipos de pruebas:

- Un primer experimento donde se somete a los usuarios a pruebas de larga duración (10 min), con el propósito de analizar la influencia del tiempo.
- Un segundo experimento realiza pruebas más cortas pero variando la altura (4,2; 8 y 12 metros), el objetivo de estas pruebas es analizar la influencia de la altura en el uso de la bomba de mecate.

A continuación enumero las variables que se analizan en este estudio:

- Profundidad
- Tiempo
- Sexo del usuario
- Edad del usuario
- Modo de realización de prueba (manivela, bicicleta)

En las diferentes pruebas realizadas se recopilan datos de dos parámetros de interés: por un lado se cuantifican las revoluciones realizadas en cada minuto, y por otro lado se analiza la evolución del pulso.

En base a estos dos parámetros se divide el estudio.

Dado el gran número de variables que presenta este apartado en primer lugar se realiza un estudio de todos los resultados en conjunto, la intención de dicho análisis es encontrar las variables que influyen de forma determinante en el uso de la bomba de mecate, y analizar cuáles son los indicadores de mayor relevancia.

En los próximos apartados se muestran y analizan los datos, organizándolo según el tipo de prueba (*pruebas cortas o pruebas largas*):

#### 4.2.7 Pruebas cortas

Las pruebas cortas descritas en los anteriores párrafos se realizan haciendo uso de la manivela y de la bicicleta dividiendo los datos en dos subgrupos:

##### *Datos manivela*

A continuación se muestra como varían los resultados obtenidos en la “pruebas cortas”. El fin de estas pruebas es estudiar la influencia que tiene la altura en los resultados. En estas gráficas se muestran los datos obtenidos haciendo uso de la manivela.

La primera gráfica muestra la evolución de la velocidad angular en función de altura a la que se realiza el experimento:

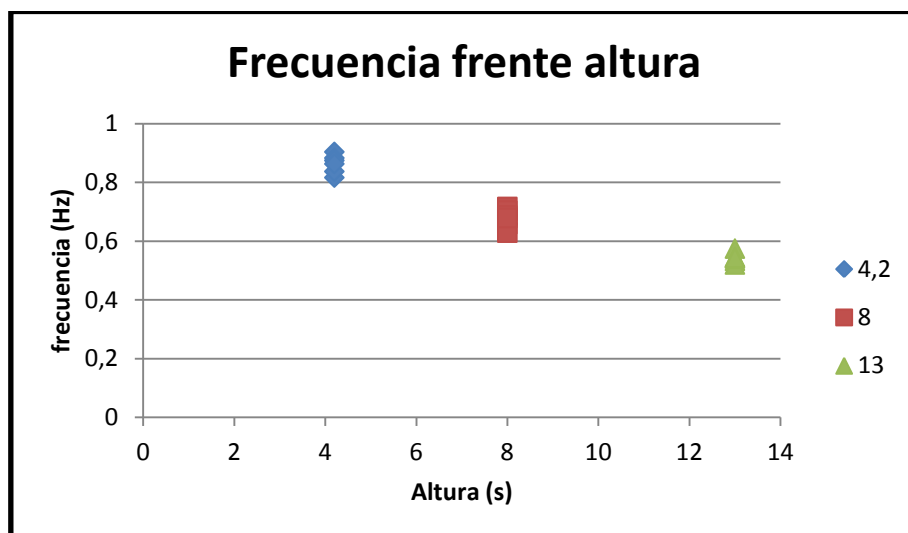
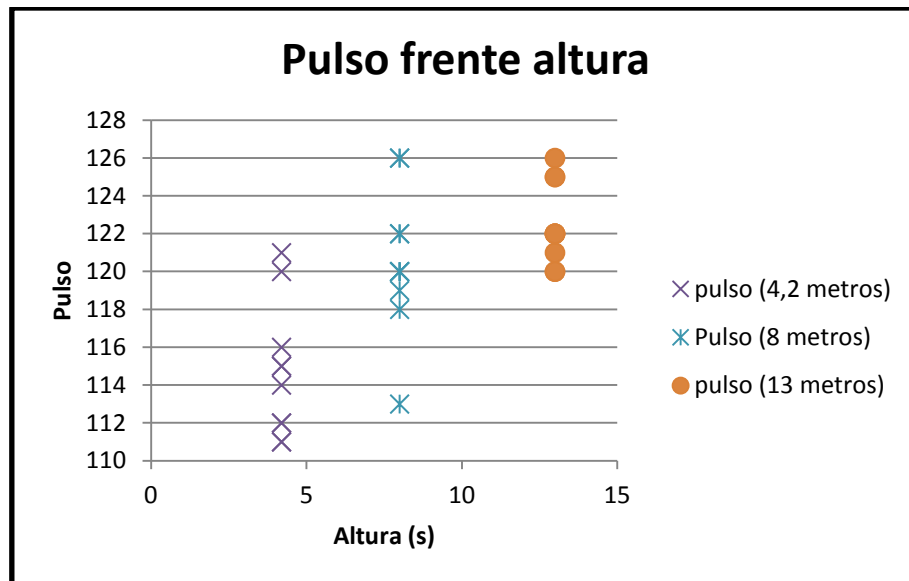


Ilustración 59 Frecuencia frente  
altura para pruebas cortas (manivela)

La segunda gráfica muestra la evolución del pulso en función de la altura a la que se realiza el experimento:



**Ilustración 60 Pulso frente altura para pruebas cortas (manivela)**

En las dos ilustraciones anteriores se recogen todos los datos obtenidos en las diferentes pruebas realizadas. En ellas se puede observar que la relación entre el pulso y la altura a la que se realiza el experimento es creciente, mientras que la relación entre la frecuencia y la altura es decreciente.

Se aprecia que la relación existente entre la frecuencia y la altura presenta una tendencia más definida que la relación que hay entre el pulso y la altura, ya que esta última presenta una gran dispersión en sus datos.

Con el fin de mostrar una gráfica más representativa se sustituye la nube de puntos por su valor medio (estas gráficas nos aportan una percepción más concreta de la evolución que presenta tanto el pulso como la velocidad angular frente a la altura).

Los datos se dividen en función del sexo y de la edad, con el objetivo de analizar la influencia de estas dos variables en el uso de la bomba de mecate.

En las ilustraciones 60; 61; 64 y 65 el eje del pulso empieza en el valor 100, realizando un zoom de la zona crítica consiguiendo apreciar mejor las diferencias existentes en las frecuencias cardíacas.

En la primera gráfica se comparan los resultados en función del sexo del usuario:

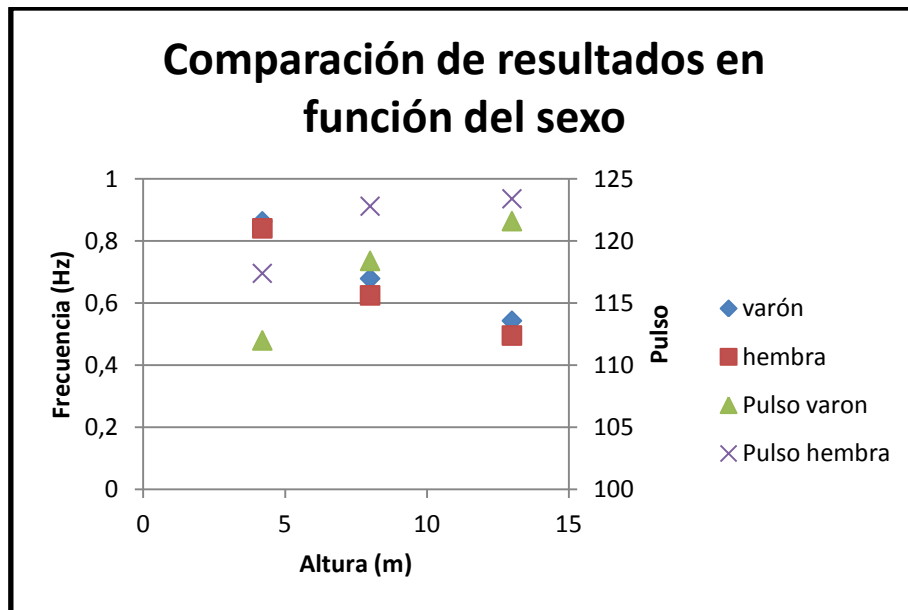


Ilustración 61 comparación de resultados en  
función del sexo

En la siguiente se muestran los resultados obtenidos en los experimentos en función de la edad del usuario:

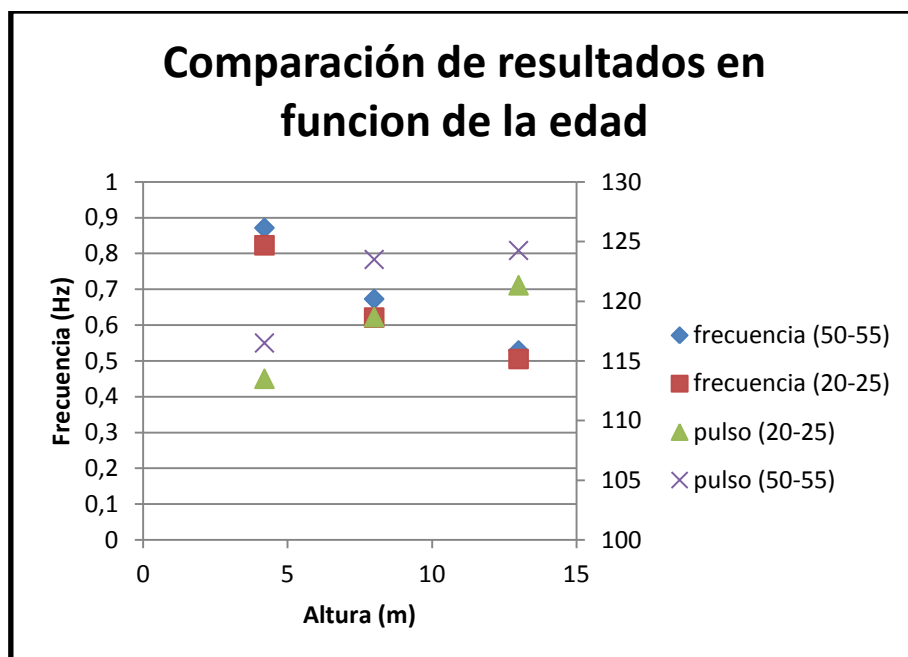


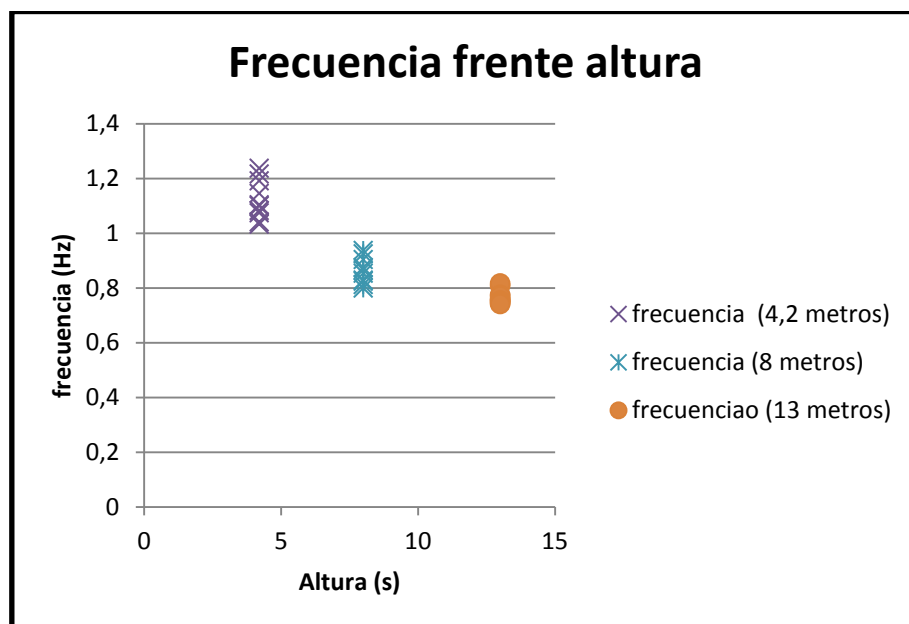
Ilustración 62 comparación de resultados en  
función de la edad

De las anteriores presentaciones se observa que la diferencia entre sexos es relativamente inexistente y constante, en la frecuencia las diferencias son muy pequeñas del orden de 0,03-0,04 Hz, mientras que en la comparación del pulso se puede observar una mayor diferencia pero constante. Esto cumple con la teoría expuesta en el capítulo: “base teórica” en el punto “caracterización fisiológica”.

### *Datos bicicleta*

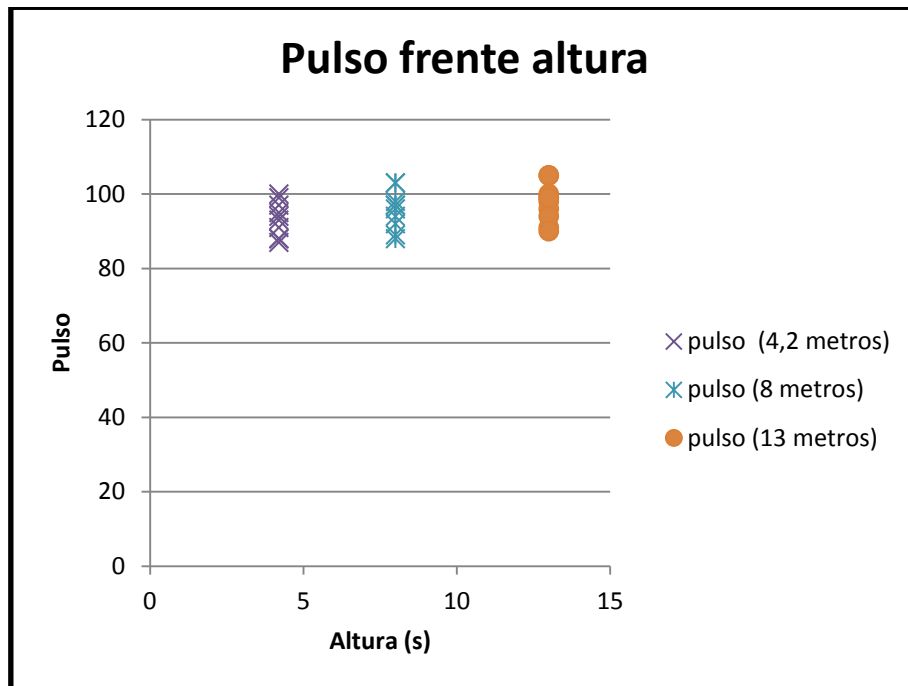
El proceso seguido para caracterizar el uso de la bicicleta es el mismo que el desarrollado en el apartado anterior.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de corta duración:



**Ilustración 63 Frecuencia frente altura para pruebas cortas (bicicleta)**





**Ilustración 64 Pulso frente altura para pruebas cortas (bicicleta)**

Al igual que las pruebas realizadas con la manivela, la relación entre el número de revoluciones por minuto y la altura queda claramente definida, mientras que la relación entre el pulso y la altura apenas presenta variación.

Con el fin de analizar la influencia que tiene el sexo del usuario o la edad del mismo se decide representar las siguientes gráficas. En la primera se muestran los resultados en función del sexo del individuo, mientras que en la segunda los datos se dividen en función de la edad de la persona.

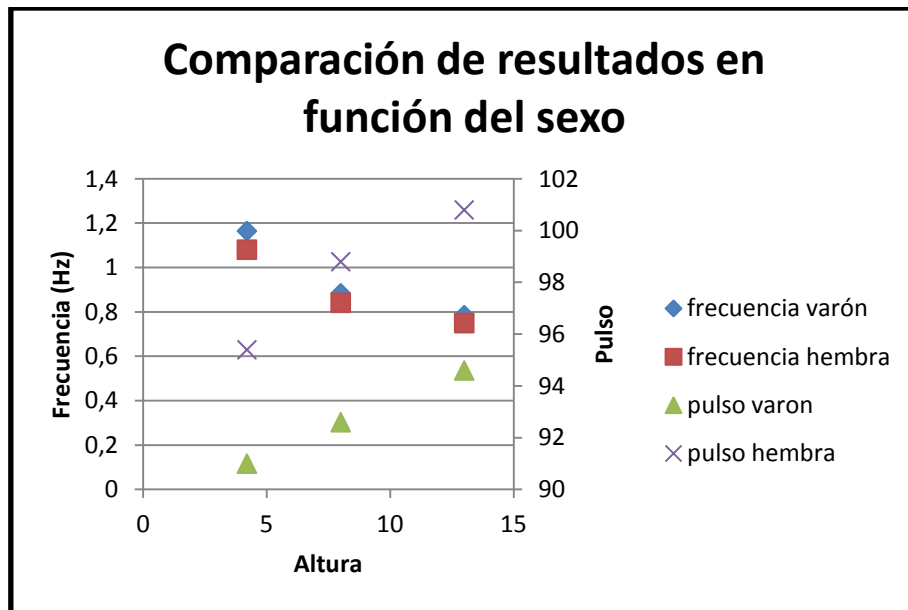


Ilustración 65 comparación de resultados en  
función del sexo

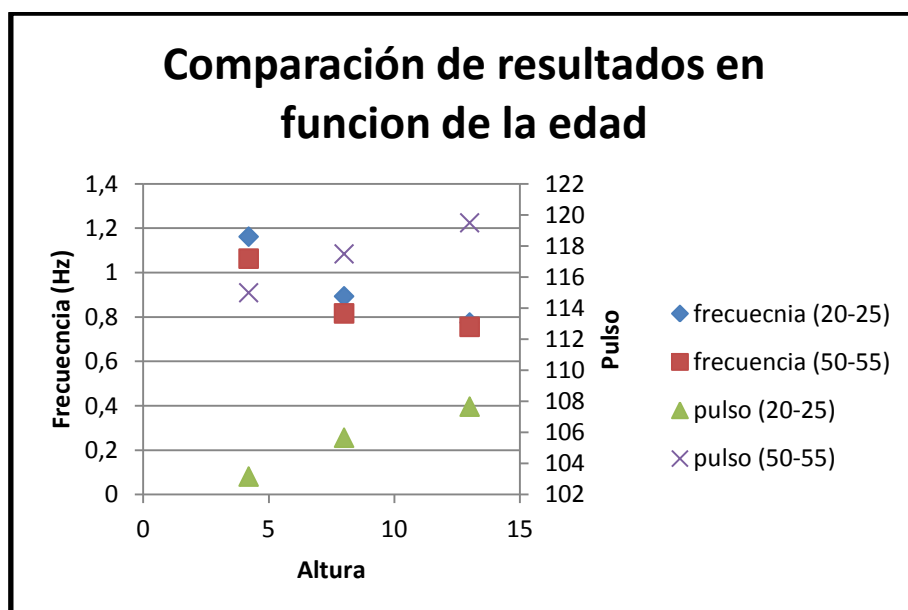


Ilustración 66 Comparación de resultados en  
función de la edad

En las anteriores gráficas queda claramente relacionada la velocidad angular frente a la altura a la que se realiza el experimento, mientras que la relación entre el pulso y la altura no queda tan claramente determinada, se observa que el pulso aumenta en función de la altura simulada, aunque los datos poseen una gran dispersión.

La edad tampoco muestra una diferencia marcada en los resultados de revoluciones por minuto, mientras que en el pulso si se muestra una discrepancia constante entre los voluntarios de edades comprendidas entre los 20-25 años y los voluntarios de edades comprendidas entre los 50-55 años.

Las conclusiones extraídas de estas dos últimas ilustraciones presentan una gran similitud con las conclusiones extraídas de las gráficas del apartado anterior (*Datos manivela*).

#### 4.2.8 Pruebas largas

Con el fin de mejorar la aproximación realizada, se somete a los voluntarios a pruebas de esfuerzo de mayor duración (10 min). El objetivo de estas pruebas es encontrar la influencia del tiempo en los parámetros de análisis (pulso y velocidad angular).

##### *Manivela*

Los datos mostrados en este apartado se obtienen de las pruebas realizadas con la manivela.

Los usuarios desarrollan dos tipos de pruebas (una a 4,2 metros y otra a 13 metros), las gráficas recopilan los datos de estas pruebas.

En la primera gráfica se muestra como varia la frecuencia en función del tiempo:

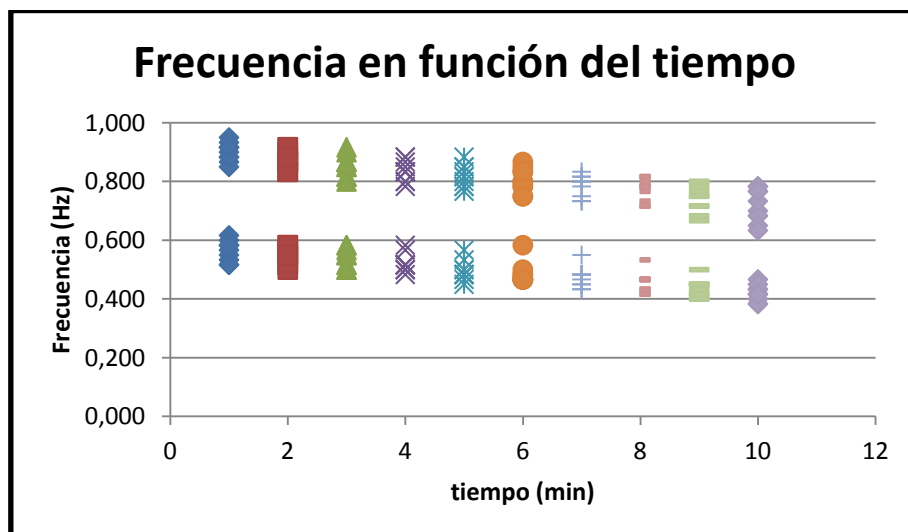


Ilustración 67 Frecuencia en función del tiempo para pruebas largas (manivela)

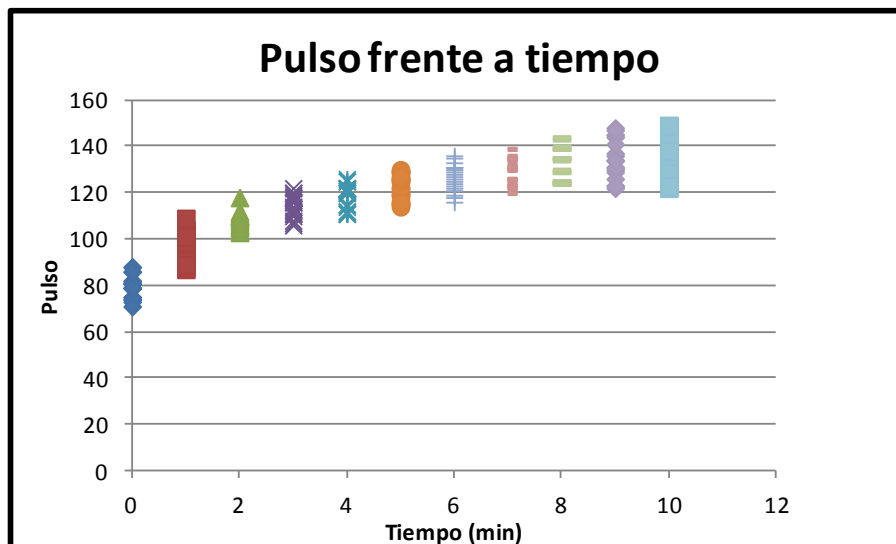


Ilustración 68 Pulso frente al tiempo para pruebas largas (manivela)

Como se puede observar en las gráficas, mientras mayor sea el tiempo menor es la velocidad angular que el usuario es capaz de desarrollar, mientras que el pulso presenta un comportamiento mucho mas asintótico, estabilizándose a partir del minuto 6 y manteniéndose estable a partir de ese momento.

### Bicicleta

Haciendo uso de la bicicleta se repiten las mismas pruebas que en el apartado anterior, obteniéndose los siguientes resultados:

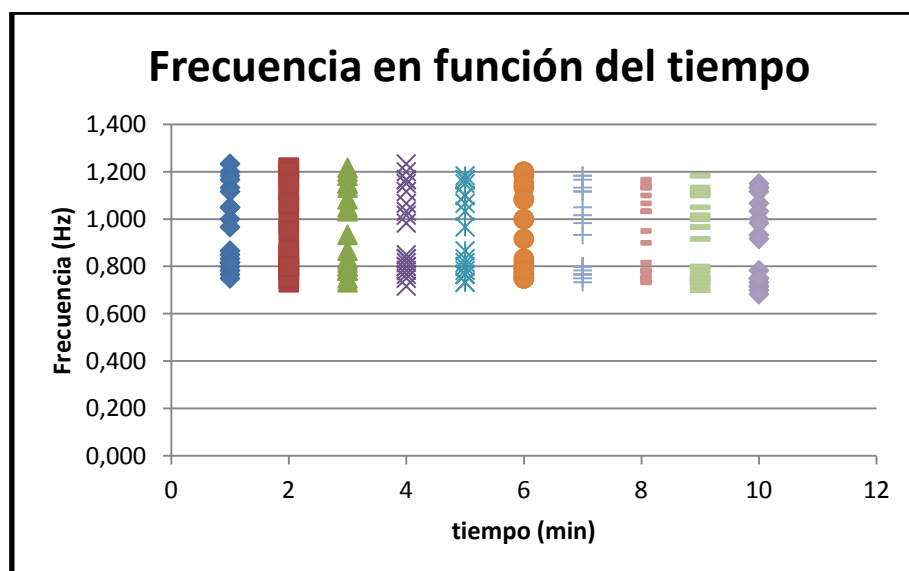


Ilustración 69 Velocidad angular frente a tiempo para pruebas largas (bicicleta)

En la anterior ilustración se muestra la evolución de la velocidad angular en función del tiempo, observándose como esta se mantiene constante.

A continuación se muestran los datos del pulso frente al tiempo:

En esta gráfica se puede ver como el pulso queda estabilizado a partir del minuto 5, además es importante resalta que todos los datos de pulso se encuentran por debajo de las 120 pulsaciones por minuto. Lo cual indica que el esfuerzo realizado no ha sido agresivo.

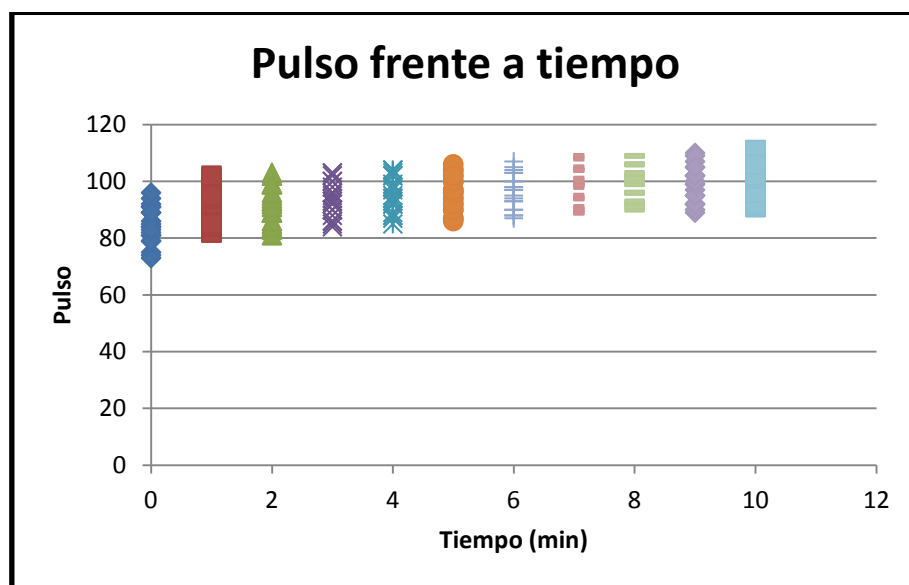


Ilustración 70 Evolución de pulso frente a tiempo para pruebas largas (bicicleta)

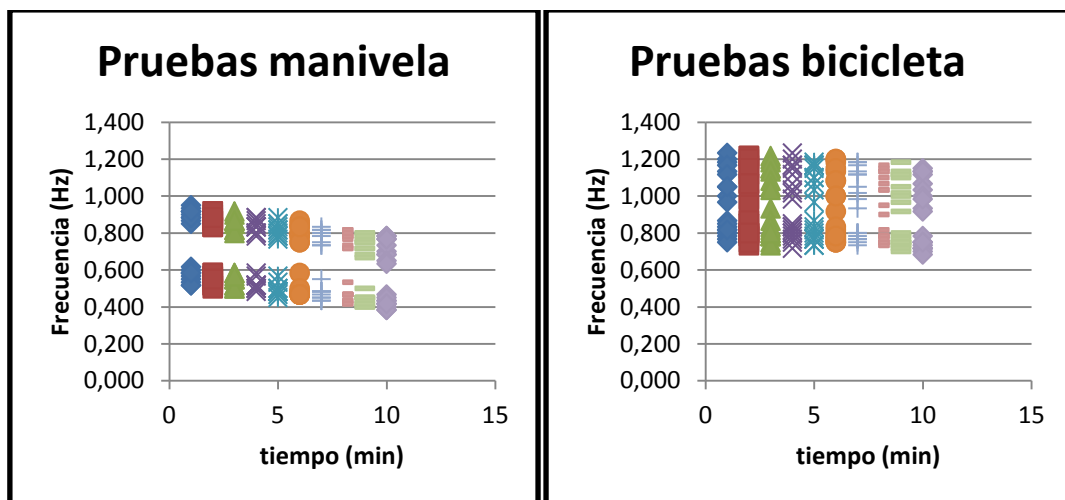
#### 4.2.9 Conclusiones caracterización fisiológica.

Las conclusiones extraídas de las anteriores pruebas son:

- La edad de los usuarios para los rangos analizados no influyen de forma determinante en el resultado, obteniéndose resultados muy parecidos para la velocidad angular, y aunque existen mayores diferencias para el pulso los datos muestra una gran similitud, reaccionando igual para los mismos esfuerzos.
- El tiempo influye tanto en el pulso como en la velocidad angular. El pulso muestra una clara estabilización conforme aumenta el tiempo de la actividad

física, dejando de crecer a partir del minuto 5 o 6. Por otro lado se puede observar la evolución de la velocidad angular con el tiempo, conforme más tiempo a transcurrido de la prueba la velocidad angular se vuelve menor. Este hecho se vuelve crítico para las pruebas realizadas con la manivela, ya que a velocidades angulares tan lentas el rendimiento energético es muy pequeño.

- La profundidad influye de forma determinante en la velocidad angular disminuyendo esta de forma clara en función de la altura que se simule, el pulso no muestra una evolución tan evidente.
- La comparación de resultados entre bicicleta y manivela muestra una mejor eficiencia en el funcionamiento cuando se usa la bicicleta, este hecho queda patente en la prueba de larga duración. A continuación se muestran las dos gráficas:



**Ilustración 71 Comparación datos manivela y datos bicicleta**

Como se observa en las anteriores, el uso de la bicicleta proporciona velocidades de funcionamiento más constantes que el de la manivela, esta situación se hace aun mas critica a partir del minuto 4 donde la velocidad angular para la manivela desciende de 0,5 Hz.

Además se puede observar en las gráficas de pulso como la manivela resulta más exigente que la bicicleta:

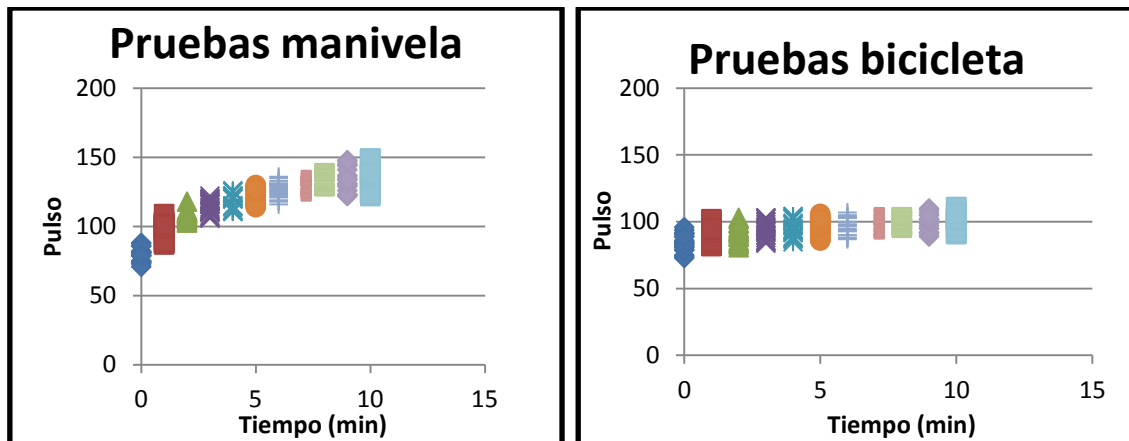


Ilustración 72 Comparación datos manivela y datos bicicleta

### 4.3 Potencia y rendimiento energético.

En este apartado se calcula la potencia de trabajo a la que se han realizado las diferentes pruebas, el fin es medir el rendimiento energético del sistema.

#### 4.3.1 Potencia de trabajo en función de la altura (manivela).

En esta sección se calcula la potencia suministrada al sistema haciendo uso de la manivela, los datos experimentales en los que se han basado los cálculos son los recopilados en el título “*Caracterización de la instalación*” dentro del capítulo de “*Resultados*”.

A continuación se muestran las gráficas donde se observan los resultados obtenidos, cuyos datos se encuentran en las tablas 18-21 del Anexo I.

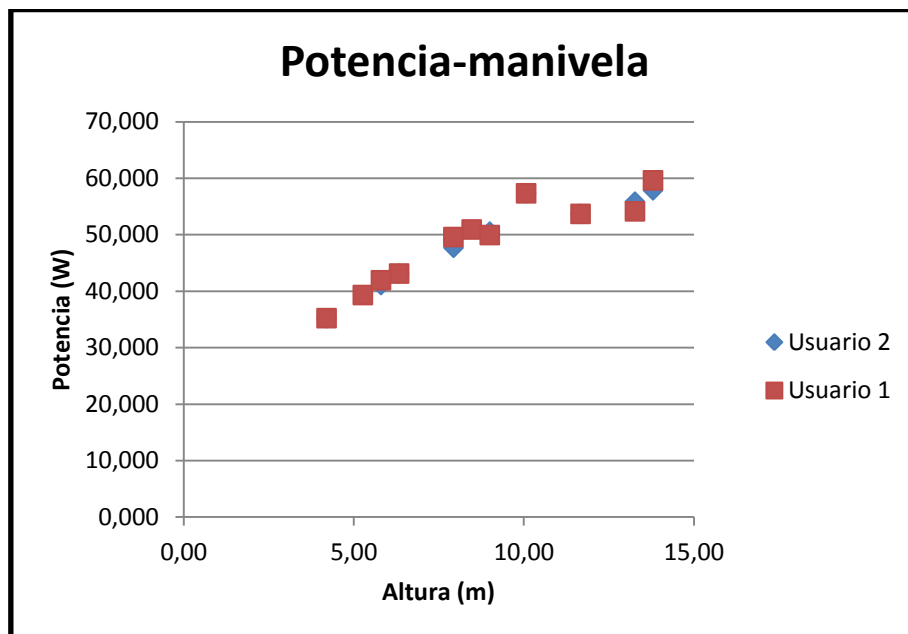


Ilustración 73 Potencia suministrada con la manivela frente altura (Usuario 2)

#### 4.3.2 Potencia de trabajo en función de la altura (bicicleta).

Al igual que en el título anterior se procede a analizar los resultados obtenidos en los experimentos, esta vez se estudia los experimentos llevados a cabo con la bicicleta. Los datos se muestran en las siguientes gráficas:



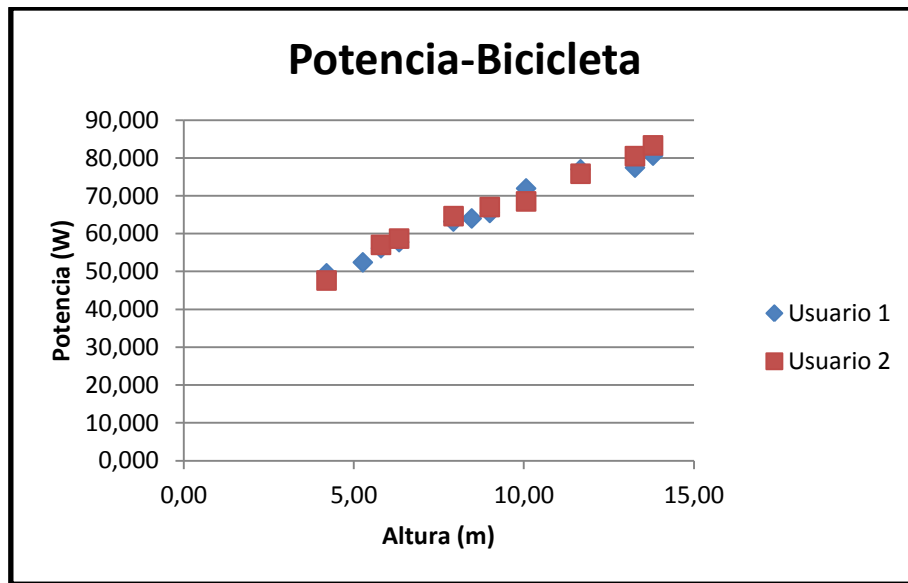


Ilustración 74 Potencia suministrada con la bicicleta frente altura (Usuario 2)

#### 4.3.3 Rendimiento energético

Una vez obtenidos los valores de la potencia suministrada al sistema, se procede a calcular el valor del rendimiento energético para las diferentes pruebas llevadas a cabo, para ello se hace uso de las ecuaciones desarrolladas en el apartado “Potencia suministrada y rendimiento energético” en el capítulo de “Base teórica”:

$$\eta_{energetico} = \frac{E_{suministrada}}{E_{ideal}} = \frac{W_{suministrada} \cdot t}{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q \cdot t} = \frac{W_{suministrada}}{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}$$

A continuación se muestra una gráfica donde se observa la evolución del rendimiento energético en función de las alturas a las que se realizan las pruebas, dichos valores tienen su correspondencia con los incluidos en las tablas 22-25 del Anexo I.

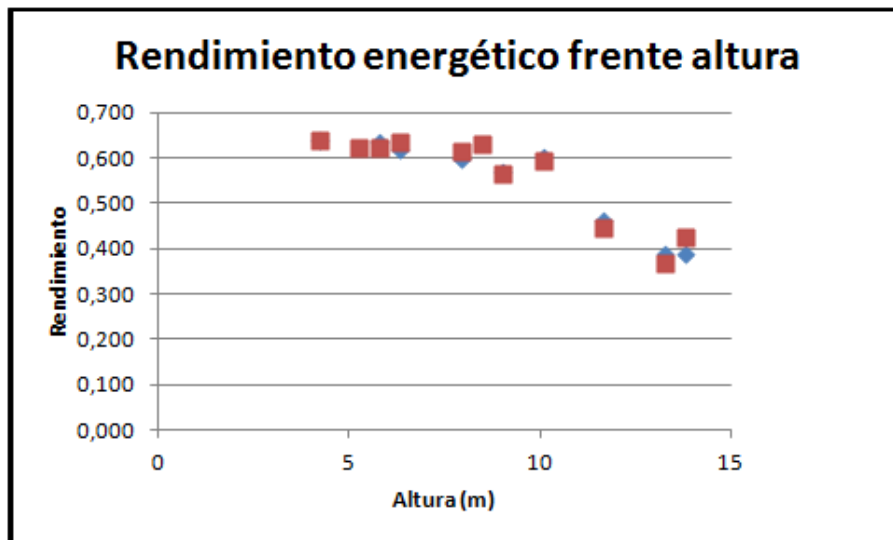


Ilustración 75 Rendimiento energético frente a altura (manivela)

En la gráfica anterior se puede observar como el rendimiento mejora para alturas pequeñas, estabilizándose en el tramo final. Lo previsible es que si la altura siguiese disminuyendo el rendimiento también lo haría ya que resultaría muy difícil aumentar la velocidad angular dada por el usuario.

Para analizar lo expuesto en el párrafo anterior se estudia la siguiente gráfica, donde se puede observar la evolución del rendimiento energético en función de la velocidad angular.

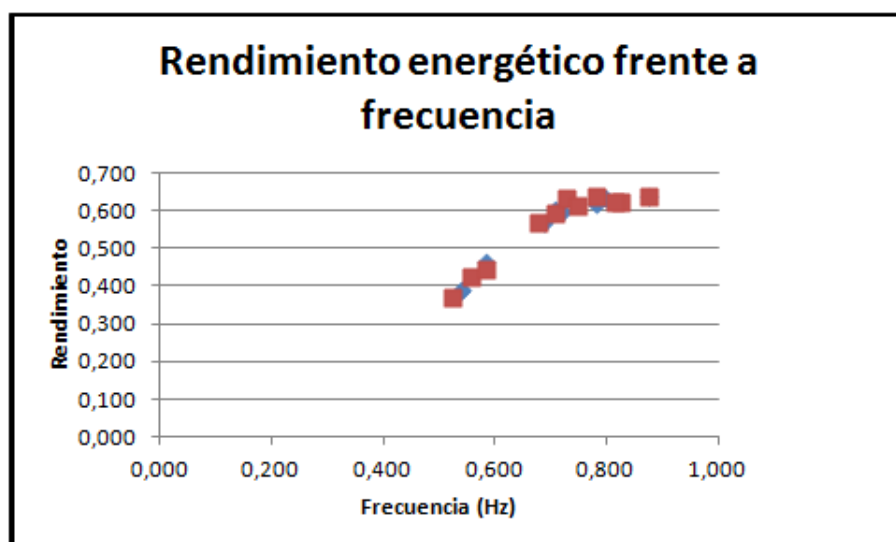


Ilustración 76 Rendimiento energético frente a frecuencia

Al igual que en la gráfica de la altura el rendimiento se estabiliza para altas velocidades angular.

A continuación se procede a estudiar los datos obtenidos mediante el uso de la bicicleta, estos datos son de gran interés ya que permiten alcanzar mayores velocidades angulares.

A continuación se muestra una gráfica donde se observa la evolución del rendimiento energético en función de las alturas a las que se realizan las pruebas:

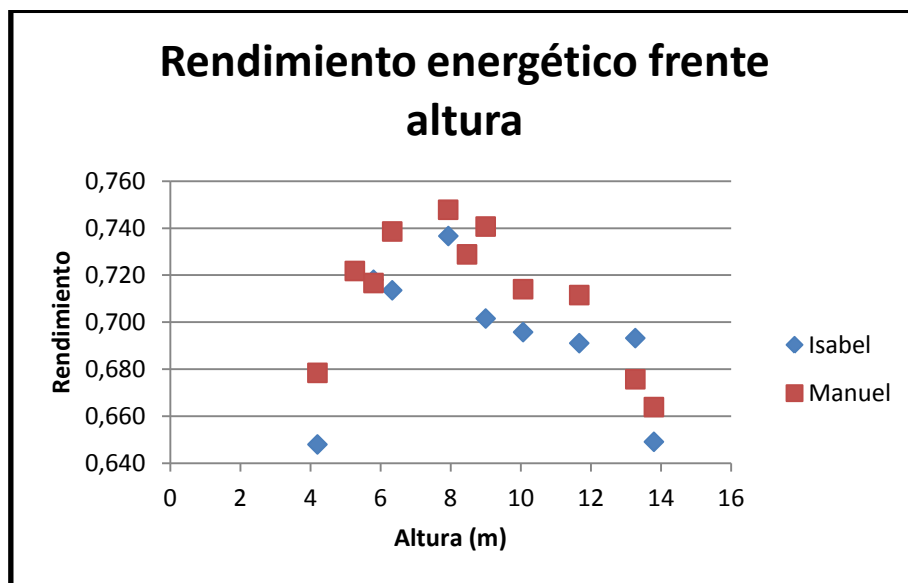


Ilustración 77 Rendimiento energético frente altura (manivela)

En la gráfica anterior se puede observar como el punto óptimo de funcionamiento se encuentra alrededor de los 8 metros de profundidad, esto es debido fundamentalmente a dos hechos:

- Para alturas menores a 8 metros el valor del par de rozamiento gana importancia frente al par producido por la columna de agua.
- Para alturas mayores a 8 metros la velocidad angular disminuye de forma constante, esto provoca que caudal de perdidas aumenta tal y como se estudió en el apartado “Caudal de perdidas en función de la frecuencia”.

La curva sigue la siguiente ecuación:

$$Q_p = -0,4377f + 0,4507 \text{ Si } 0,5 < f < 1$$

Para analizar la influencia que presenta la velocidad angular en el rendimiento se realiza la siguiente gráfica:

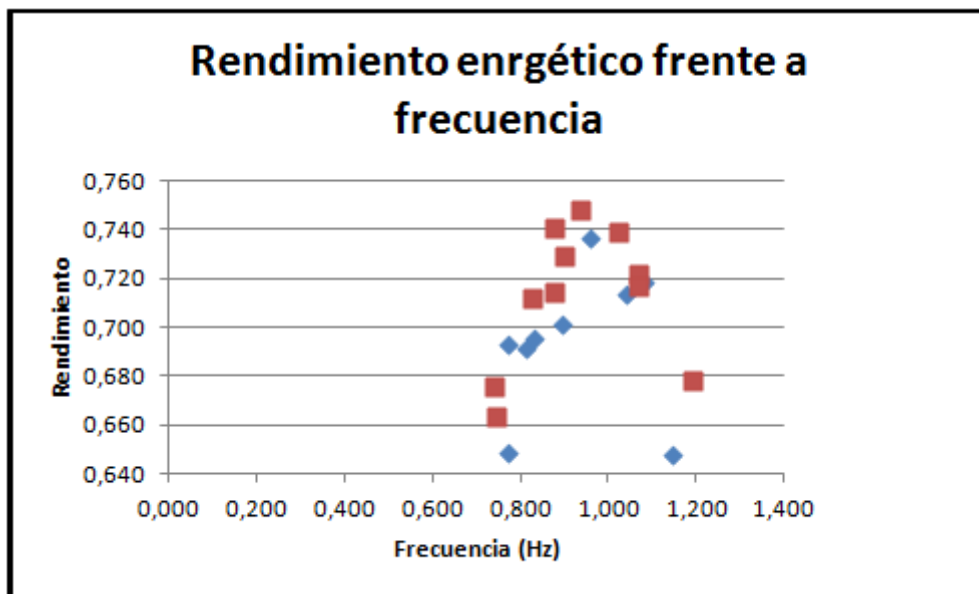


Ilustración 78 Rendimiento energético frente a frecuencia

En la gráfica se observa como el rendimiento se maximiza para velocidades angular alrededor de 1 Hz, empeorando este rendimiento para velocidades mayores y menores.

#### 4.4 Análisis adecuación de la bomba de mecate.

En este apartado se analiza si una familia compuesta por 6 miembros sería capaz de abastecerse de agua haciendo uso de la bomba de mecate estudiada en este proyecto, para este análisis se realiza las siguientes suposiciones:

- 10 metros de profundidad del pozo.
- 50 litros/persona día (dato ofreció por la OMS).
- Los datos de caudal están basados en los experimentos realizados en este proyecto.
- Haciendo uso de la bicicleta el caudal para 10 metros es de 0.5l/s.
- Haciendo uso de la manivela el caudal para 10 metros es de 0.3l/s.

Partiendo de las condiciones expuestas se procede a calcular el tiempo de uso de la bomba necesario:

- Manivela:

$$T_{uso} = \frac{V_{necesario\ de\ agua}}{Q} = \frac{300\ l}{0,3\ l/s} = 1000s \approx 17min$$

- Bicicleta:

$$T_{uso} = \frac{V_{necesario\ de\ agua}}{Q} = \frac{300\ l}{0,5\ l/s} = 600s \equiv 10min$$

Estos datos demuestran que la bomba de mecate es una solución muy buena para la extracción de agua en pozos de poca profundidad.

## 5 Conclusiones

Tras el análisis desarrollado en este proyecto se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los datos obtenidos muestran que la bomba de mecate es una solución aceptable para el abastecimiento de agua, ya que necesita muy poco esfuerzo para obtener un flujo constante.
- La bomba de mecate es un sistema que presenta una gran eficiencia energética, en el punto óptimo de funcionamiento alrededor de un 75% de rendimiento.
- La bici-bomba proporciona mejores resultados que la bomba de mecate, además permite al usuario suministrar una energía constante durante un periodo de tiempo mayor que el conseguido con la bomba.
- En este proyecto se ha realizado un análisis del caudal de perdidas en función de la velocidad angular. Basándose en esos datos resulta recomendable diseñar las bombas de mecate para que un usuario medio pueda trabajar a una alta velocidad angular, mejorándose el rendimiento del sistema.
- Se muestra como el rendimiento del sistema disminuye a partir de grandes profundidades (10 metros para la manivela 14 metros para la bici-bomba). Lo

cual incide sobre la idea de que la bomba de mecate es una buena solución para pozos no muy profundos.

Una vez expuestas las conclusiones se procede a enumerar las distintas vías de estudio que presenta este proyecto:

- Como se ha podido observar la instalación tiene una altura óptima de funcionamiento, resultará interesante estudiar los parámetros que influyen en el rendimiento del sistema, optimizándolo para diferentes alturas.
- En este apartado se ha considerado una tensión fija para la cuerda, puede ser importante analizar la tensión de la cuerda en función de la altura de la torre de agua, para ello es necesario situar la instalación a diferentes alturas.
- Otro punto de interés es el análisis de las dimensiones y formas de los pistones, analizando para cada tipo de pistón el caudal de pérdidas, el par de rozamiento, el rendimiento del sistema con los nuevos pistones etc.
- Instalación de un motor eléctrico con velocidad variable que proporcione una velocidad controlada, consiguiendo de esta forma datos más fiables de caudal de pérdidas, potencia suministrada etc.
- Analizar cómo influye la variación del diámetro de la tubería frente al rendimiento.

## 6 Nomenclatura

A continuación se muestra una tabla donde se recogen todas las abreviaturas usadas en el proyecto y su significado.

Abreviatura:	Significado:
$\tau_{fr}$	Par producido por las fuerzas de rozamiento
$R_{DF}$	Radio disco de freno
$F_{din}$	Fuerza indicada por el dinamómetro
$M_{din}$	Masa indicada por el dinamómetro
$v_{tubería}$	Volumen tubería
$h$	Altura tubería
$v_{pistón}$	Volumen pistón



$v_{cuerda}$	Volumen ocupado por la cuerda en el interior de la tubería
$n_{pistones}$	Numero de pistones que se encuentran en el interior de la tubería
$P_{agua}$	Peso debido al agua que se encuentra en el interior de la tubería
$\rho$	Densidad del agua
$R_{rueda}$	Radio de la rueda
$\tau_{ca}$	Par provocado por la columna de agua
$Q_{teórico}$	Caudal teórico
$\omega$	Velocidad angular
$Q_{P e}$	Caudal de perdidas estático
$\phi$	Factor de corrección, (tiene en cuenta el aire que se introduce en la instalación)
$W_s$	Potencia media suministrada al sistema
$\eta_{energetico}$	Rendimiento energético

$E_{suministrada}$	Energía suministrada a la instalación
$E_{ideal}$	Energía necesaria para conseguir el caudal experimental (ideal)
$v_{perdidas}$	Velocidad a la que desciende el frente de agua
$\omega_{cri}$	Velocidad angular crítica (mínima para la cual se extrae agua)
$f_{cri}$	Frecuencia crítica (mínima para la cual se extrae agua)
$\eta_v$	Rendimiento volumétrico
$Q_{re}$	Caudal real experimental
$Q_{it}$	Caudal ideal teórico
$Q_{pd}$	Caudal de pérdidas dinámico, (en función de la velocidad angular)

## 7 Bibliografía

- ROPE Pump Madagascar Specification. Edition 2004
- Mack y Haslegrave 1990\_Evaluation of the use of a Hand pump
- Sergio Ruiz Martin. Instrumentación, adquisición de datos y ensayo de bici-bombas de mecate. Universidad Carlos III de Madrid. 2011
- Javier Tobella Arredondo. Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate. Universidad Carlos III de Madrid. 2011
- *J. Antonio Hernandez. I-natación.*
- El mercado de las bombas de mecate en Nicaragua. Informe del Banco Mundial.